

Titre: Nouvelle méthode d'intégration énergétique pour la rétro-
installation des procédés industriels et la transformation des usines
papetières
Title:

Auteur: Jean-Christophe Bonhivers
Author:

Date: 2013

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Bonhivers, J.-C. (2013). Nouvelle méthode d'intégration énergétique pour la rétro-
installation des procédés industriels et la transformation des usines papetières
Citation: [Ph.D. thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/1208/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie:
PolyPublie URL: <https://publications.polymtl.ca/1208/>

**Directeurs de
recherche:** Paul Stuart
Advisors:

Programme: Génie chimique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

NOUVELLE MÉTHODE D'INTÉGRATION ÉNERGÉTIQUE POUR LA
RÉTRO-INSTALLATION DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS ET LA
TRANSFORMATION DES USINES PAPETIÈRES

JEAN-CHRISTOPHE BONHIVERS

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR
(GÉNIE CHIMIQUE)

AOÛT 2013

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

NOUVELLE MÉTHODE D'INTÉGRATION ÉNERGÉTIQUE POUR LA RÉTRO-
INSTALLATION DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS ET LA TRANSFORMATION DES
USINES PAPETIÈRES

présentée par : BONHIVERS Jean-Christophe

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. LEGROS Robert, Ph.D., président

M. STUART Paul, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. PERRIER Michel, Ph.D., membre

M. BERNTSSON Thore, Ph.D., membre

DÉDICACE

À ma famille et amis

REMERCIEMENTS

Je tiens sincèrement à remercier tous ceux qui m'ont aidé dans ce doctorat

Merci à Paul, mon directeur de recherche, pour sa vision stratégique, son art de diriger un groupe et son aide.

Merci aux Professeurs de l'École Polytechnique pour leur compétence, leur intégrité et leur générosité dans le quotidien.

Merci à Agnès pour sa recherche de vérité, son éveil et son empathie. Sa présence a été un cadeau.

Merci à tous mes amis de la Chaire pour leur soutien et le partage, et en particulier Louis-Patrick, Jawad, Milan, Virginie, Behrang, José, Shabnam, Jean-Martin, Hakim.

RÉSUMÉ

L'augmentation rapide de la création de richesses ces dernières décennies a suscité le besoin d'améliorer la gestion globale des ressources naturelles et d'accroître l'efficacité de la production industrielle. Afin de répondre à ce besoin, les méthodes d'intégration énergétique pour les systèmes industriels ont été développées. Elles ont un succès évident dans le domaine de la conception de nouvelles usines : les principes d'intégration sont enseignés et appliqués, et l'intensité énergétique des nouveaux procédés a beaucoup diminué. En comparaison, les méthodes d'intégration par rétro-installation requièrent encore des développements conceptuels bien que des progrès significatifs aient été réalisés. Le principe des approches actuelles consiste souvent à identifier des modifications qui permettent au système existant de se rapprocher d'une situation de référence. Leur utilisation est difficile, et les difficultés méthodologiques augmentent si le réseau inclut différents types de transfert de chaleur, par exemple des échangeurs à contact indirect et des mélanges non-isothermes, comme dans les usines papetières où les réseaux d'eau et d'énergie sont étroitement liés.

L'industrie papetière essaie d'augmenter sa rentabilité par la réduction des coûts de production et l'amélioration de la chaîne logistique. À la suite de récents développements de procédé, le bioraffinage forestier offre à l'industrie papetière des opportunités de se diversifier, d'élargir son portefeuille de bioproduits et de moderniser son système énergétique. Cependant l'identification de stratégies énergétiques pour un site industriel, incluant les possibilités de transformation d'une usine papetière, nécessite l'utilisation de méthodes d'intégration adéquates en situation de rétro-installation.

L'objectif de cette thèse est développer une méthode d'intégration énergétique pour la rétro-installation des procédés industriels en général et la transformation des usines papetières, et de l'appliquer à des études de cas.

L'énergie est conservée et dégradée dans un procédé. La chaleur est soit convertie en électricité, soit stockée sous forme chimique, soit rejetée à l'environnement où sa dégradation est maximale. L'analyse des dégradations successives de l'énergie entre les utilités chaudes et l'environnement au travers des opérations de procédé et des échangeurs de chaleur existants est de grande importance pour réduire la consommation de chaleur.

La méthode pontale d'intégration énergétique par rétro-installation a été développée dans le cadre de cette thèse. Cette méthode est la seule à considérer cette analyse des dégradations. Le processus fondamental de réduction de consommation d'énergie est pour la première fois rendu explicite; il est à la base de la méthode développée. La méthode pontale inclut la définition du « pont », qui est un ensemble de modifications conduisant à une réduction de la consommation d'énergie dans un réseau d'échangeurs de chaleur. Il est prouvé que, pour un ensemble donné de courants, seulement un pont peut réduire la consommation d'énergie. La méthode pontale inclut une procédure pour énumérer les ponts de façon systématique, une « table de réseau » pour l'évaluation facile de ceux-ci, une procédure générale pour la rétro-installation des réseaux d'échangeurs de chaleur, et un « diagramme de transfert d'énergie » permettant de visualiser les deux premiers principes de la thermodynamique dans un procédé industriel et identifier l'ensemble des opportunités énergétiques. La méthode peut être utilisée pour l'analyse des réseaux incluant plusieurs types de transfert de chaleur, et pour l'intégration à l'échelle du site industriel.

La méthode pontale a ensuite été appliquée pour la rétro-installation des réseaux d'échangeurs de chaleur à contact indirect, incluant celui d'un procédé de pâte kraft, et des réseaux d'échangeurs de chaleur à contact direct, incluant le système de production d'eau chaude d'une usine papetière. Elle a finalement été utilisée pour l'intégration d'un procédé de bioraffinage, seul ou bien associé à un procédé de pâte kraft. Les résultats montrent que la méthode pontale permet de réduire efficacement l'espace de recherche et identifier les solutions pertinentes.

La nécessité du pont pour réduire les entrées et sorties d'un procédé est une conséquence des deux premiers principes de la thermodynamique de conservation de l'énergie et augmentation de l'entropie. Le principe du pont peut être utilisé tant dans les approches numériques d'optimisation pour l'intégration énergie, que librement comme outil d'analyse de procédé.

ABSTRACT

The increase in production of goods over the last decades has led to the need for improving the management of natural resources management and the efficiency of processes. As a consequence, heat integration methods for industry have been developed. These have been successful for the design of new plants: the integration principles are largely employed, and energy intensity has dramatically decreased in many processes. Although progress has also been achieved in integration methods for retrofit, these methods still need further conceptual development. Furthermore, methodological difficulties increase when trying to retrofit heat exchange networks that are closely interrelated to water networks, such as the case of pulp and paper mills.

The pulp and paper industry seeks to increase its profitability by reducing production costs and optimizing supply chains. Recent process developments in forestry biorefining give this industry the opportunity for diversification into bio-products, increasing potential profit margins, and at the same time modernizing its energy systems. Identification of energy strategies for a mill in a changing environment, including the possibility of adding a biorefinery process on the industrial site, requires better integration methods for retrofit situations.

The objective of this thesis is to develop an energy integration method for the retrofit of industrial systems and the transformation of pulp and paper mills, and to demonstrate the method in case studies.

Energy is conserved and degraded in a process. Heat can be converted into electricity, stored as chemical energy, or rejected to the environment. A systematic analysis of successive degradations of energy between the hot utilities until the environment, through process operations and existing heat exchangers, is essential in order to reduce the heat consumption.

In this thesis, the “Bridge Method” for energy integration by heat exchanger network retrofit has been developed. This method is the first that considers the analysis of these degradations. The fundamental mechanism to reduce the heat consumption in an existing network has been made explicit; it is the basis of the developed method. The Bridge Method includes the definition of “a bridge”, which is a set of modifications leading to heat reduction in a heat exchanger network. It is proven that, for a given set of streams, only bridges can lead to heat savings. The Bridge Method also includes (1) a global procedure for heat exchanger network retrofit, (2) a procedure

to enumerate systematically the bridges, (3) “a network table” to easily evaluate them, and (4) an “energy transfer diagram” showing the effect of the two first principles of thermodynamics of energy conservation and degradation in industrial processes in order to identify energy savings opportunities. The Bridge Method can be used for the analysis of networks including several types of heat transfer, and site-wide analysis.

The Bridge Method has been applied in case studies for retrofitting networks composed of indirect-contact heat exchangers, including the network of a kraft pulp mill, and also networks of direct-contact heat exchangers, including the hot water production system of a pulp mill. The method has finally been applied for the evaluation of a biorefinery process, alone or hosted in a kraft pulp mill. Results show that the use of the method significantly reduces the search space and leads to identification of the relevant solutions.

The necessity of a bridge to reduce the inputs and outputs of a process is a consequence of the two first thermodynamics principles of energy conservation and increase in entropy. The concept of bridge alone can also be used as a tool for process analysis, and in numerical optimization-based approaches for energy integration.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XV
LISTE DES ANNEXES.....	XVII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique et mise en contexte.....	1
1.2 Objectifs	2
1.3 Organisation de la thèse	3
CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE	4
2.1 Méthodes de rétro-installation des réseaux d'échangeurs de chaleur à contact indirect..	5
2.1.1 Méthodes basées sur l'analyse de pincement.....	5
2.1.2 Approche pincement de réseau (network pinch approach)	11
2.1.3 Approches d'optimisation numérique	15
2.1.4 Analyse critique.....	20
2.2 Méthodologies d'analyse des interactions entre les réseaux d'eau et de chaleur.....	21
2.2.1 Interactions des réseaux d'eau et énergie dans l'industrie papetière	21
2.2.2 Analyse de pincement modifiée	23
2.2.3 Optimisation combinée eau et énergie (C.E.W.O.).....	25

2.2.4	Méthodologie unifiée d'analyse énergétique	28
2.2.5	Méthodologie de conception des circuits d'eau et des réseaux correspondants d'échangeurs de chaleur	30
2.2.6	Analyse critique.....	38
2.3	Représentations visuelles des concepts utilisés pour l'intégration énergétique par rétro-installation	39
2.3.1	Revue générale	39
2.3.2	Courbes Composites Avancées	42
2.3.3	Graphe des charges thermiques.....	46
2.3.4	Graphe de différence de température	48
2.3.5	Graphe de l'aire d'échange en fonction de la consommation d'énergie	50
2.3.6	Analyse critique.....	52
2.4	Lacunes dans l'ensemble des connaissances.....	53
2.5	Hypothèses	55
CHAPITRE 3	APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	57
CHAPITRE 4	SYNTHÈSE	59
4.1	Présentation des articles	59
4.2	Concepts de la méthode pontale.....	64
4.2.1	Nomenclature et conventions	64
4.2.2	Extraction de données	65
4.2.3	Pont de chaleur	66
4.2.4	Identification des ponts	70
4.2.5	Évaluation des ponts.....	73
4.2.6	Table de réseau.....	75
4.2.7	Extension de la méthode pontale aux transferts directs de chaleur	82

4.2.8	Diagramme de transfert d'énergie.....	83
4.2.9	Procédure de la méthode pontale pour la rétro-installation des réseaux d'échangeurs 104	
4.2.10	Résumé.....	107
CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE		108
5.1	Méthode d'énumération des ponts	108
5.2	Analyse des forces et faiblesses de la méthode pontale	112
CHAPITRE 6 CONCLUSIONS		116
6.1	Contributions à l'ensemble des connaissances.....	116
6.2	Recommandations pour travaux futurs	117
BIBLIOGRAPHIE		118
ANNEXES		128

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Liens entre les hypothèses et les articles	63
Tableau 4.2 Représentation des couples fournisseur-récepteur	64
Tableau 4.3 Comparaison des modèles de transfert de chaleur	74
Tableau 4.4 Table de première décomposition du réseau initial avec capacité d'échange	76
Tableau 4.5 Table de première décomposition du réseau après modifications pontales	77
Tableau 4.6 Table de seconde décomposition correspondant au réseau initial.....	80
Tableau 4.7 Table de seconde décomposition du réseau après modification pontale.....	81
Tableau 5.1 Effet du premier filtre seul	109
Tableau 5.2 Effet du second filtre seul.....	110
Tableau 5.3 Effet combiné des deux premiers filtres sur l'espace de recherche	111

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 Exploration de solutions avec la méthode Matrix.	7
Figure 2-2 Étapes de l'Analyse des Chemins ou Ciblage Structurel	10
Figure 2-3 Exemple de réseau avec un chemin refroidisseur-réchauffeur	13
Figure 2-4 Réseau après ajout de surface et sans modification topologique	13
Figure 2-5 Réseau final correspondant à la consommation minimale d'énergie	13
Figure 2-6 Approche du Pincement de Réseau	14
Figure 2-7 Stratégie proposée par Ciric et Floudas	18
Figure 2-8 Stratégie proposée par Rezaei et Shaffiei	19
Figure 2-9 Identification de projets eau par l'analyse de pincement modifiée	24
Figure 2-10 Étapes principales de la méthodologie C.E.W.O.	25
Figure 2-11 Courbes composites relatives à l'eau dans l'approche C.E.W.O.	27
Figure 2-12 Projet identifié par l'approche C.E.W.O.	27
Figure 2-13 Principe de la Méthode du Pincement Massique.....	34
Figures 2-14 Possibilité de modifier les courbes composites par mélange.....	35
Figures 2-15 Modification des courbes composites afin de réduire le nombre de courants	36
Figures 2-16 Modification des courbes composites pour augmenter le nombre de systèmes	37
Figures 2-17 Courbes composites avancées au-dessus (a) et en dessous (b) du pincement	45
Figure 2-18 Graphe de charge thermique.....	47
Figure 2-19 Graphe de différence de température	49
Figure 2-20 Graphe d'aire d'échange en fonction de la consommation d'énergie	51
Figure 2-21 Problématique de l'analyse énergétique des usines de pâte et papiers et bio- raffineries	55
Figure 3-1 Méthodologie générale du projet.....	58

Figure 4-1 Organisation des articles.....	60
Figure 4-2 Exemple de réseau d'échangeurs de chaleurs	65
Figures 4-3 Ponts premiers.....	69
Figure 4-4 Décomposition en intervalles de température pour notre exemple	79
Figures 4-5 Diagramme de transfert d'énergie et consommation minimale.....	86
Figures 4-6 Débit identique de chaleur entre l'utilité chaude et l'environnement.....	87
Figures 4-7 Courbe de transfert de chaleur pour un échangeur	90
Figure 4-8 Courbe de transfert de chaleur pour un système de colonne de distillation	91
Figures 4-9 Exemple de réseau avant (a) et après (b) rétro-installation.....	94
Figure 4-10 Diagramme de transfert d'énergie avant (a) et après (b) rétro-installation	95
Figure 4-11 Explication de la réduction du débit par modifications pontales	96
Figure 4-12 Réduction de la consommation minimale par modification de PO_2	97
Figure 4-13 Diagramme de transfert d'énergie avec conversion d'énergie	98
Figure 4-14 Évaluation du minimum de la consommation d'énergie avec contrainte.....	100
Figure 4-15 Procédure de la méthode pontale.....	106

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A_i	Aire de surface d'échange pour l'intervalle de température i
$a_m^s b_n^r$	Couple composé du fournisseur de A_m et du récepteur de B_n , où A_m et B_n peuvent être un réchauffeur, un échangeur interne ou un refroidisseur.
B	Exergie, kJ
c_x^r	Récepteur du système de refroidissement C_x
c_x^s	Fournisseur du système de refroidissement C_x
C_x	Refroidisseur ou système naturel de refroidissement
C_p	Chaleur spécifique, kJ/°C/kg
CU	Utilité de refroidissement
$\dot{E}(T)$	Débit d'énergie transférée à travers la température T , kW
E_y	Échangeur de chaleur interne (procédé-procédé)
e_y^r	Récepteur de l'échangeur interne E_y
e_y^s	Fournisseur de l'échangeur interne E_y
Env:	Environnement
F_i	Facteur de correction pour l'intervalle de température i
$h_{j,i}$	Coefficient de transfert de chaleur du courant chaud j dans l'intervalle de température i
$\dot{h}_i(T)$	Débit de chaleur cumulée de l'entrée i à la température T , kW
$\dot{h}_o(T)$	Débit de chaleur cumulée de la sortie o à la température T , kW
H	Enthalpie, kJ
$H_i(T)$	Enthalpie massique de l'entrée i à la température T , kJ/kg
$H_o(T)$	Enthalpie massique de la sortie o à la température T , kJ/kg

H_z	Réchauffeur
h_z^r	Récepteur du réchauffeur H_z
h_z^s	Fournisseur du réchauffeur H_z
HU	Utilité de chauffage
\dot{m}_i	Débit massique de l'entrée i , kg/s
\dot{m}_o	Débit massique de la sortie o , kg/s
N_c	Nombre de courants froids
N_h	Nombre de courants chauds
N_s	Nombre de systèmes séparés
N_{Umin}	Nombre minimum d'unités d'échangeur de chaleur
$Q_{j,i}$	Chaleur transférée du courant chaud j dans l'intervalle de température i
S	Entropie, kJ/°C
T_c	Température d'extrémité froide
T_e	Température de l'environnement
T_h	Température d'extrémité chaude
T_i	Température de l'entrée i
T_o	Température de la sortie o
ΔTlm_i	Moyenne logarithmique de la différence de température dans l'intervalle i

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 ARTICLE : BRIDGE ANALYSIS TO REDUCE THE INDUSTRIAL ENERGY REQUIREMENTS BY HEAT EXCHANGER NETWORK RETROFIT: PART 1 – CONCEPTS	129
ANNEXE 2 ARTICLE : BRIDGE ANALYSIS TO REDUCE THE INDUSTRIAL ENERGY REQUIREMENTS BY HEAT EXCHANGER NETWORK RETROFIT: PART 2 - APPLICATIONS	165
ANNEXE 3 ARTICLE : APPLICATION OF BRIDGE ANALYSIS TO RETROFITTING DIRECT- AND INDIRECT-CONTACT EXCHANGE NETWORKS	189
ANNEXE 4 ARTICLE : ENERGY TRANSFER DIAGRAM FOR IMPROVING INTEGRATION OF INDUSTRIAL SYSTEMS.....	222
ANNEXE 5 RAPPORT : FORMULATION MATHÉMATIQUE POUR IDENTIFIER LE RÉSEAU D'ÉCHANGEURS DE CHALEUR.....	255

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Problématique et mise en contexte

Depuis plusieurs années, l'industrie papetière au Canada connaît des difficultés de rentabilité. La rentabilité dépend du volume de vente et de la différence entre le prix de vente et le coût de production. Le volume de vente n'augmente pas et même décroît dans certaines catégories de papier, correspondant à des changements de consommation. Le prix de vente est resté bas du fait d'une surabondance de l'offre, venant notamment d'une compétition avec des producteurs à bas coût. Les coûts de production des usines papetières au Canada sont relativement élevés, principalement du fait de leur taille modeste, leur plus faible efficacité due à un sous-investissement, et le coût de la biomasse et de la main-d'œuvre. Cette situation a suscité une réorganisation de l'industrie et des changements importants, notamment dans la conscience de la nécessité de réduire les coûts relatifs à la consommation d'énergie, la gestion de la chaîne logistique, et la vision du modèle d'affaires.

Des développements récents de bioprocédés permettant de mieux valoriser la biomasse forestière ont mené au concept de « bioraffinerie », qui offre de grandes opportunités tant pour la société que pour l'industrie forestière. La biomasse peut devenir une matière première privilégiée pour la production de composés biochimiques à valeur ajoutée, biomatériaux, et combustibles/carburants/électricité si ces derniers sont obtenus en parallèle avec d'autres produits sur le site industriel.

Les usines papetières sont considérées comme des hôtes naturels pour accueillir des procédés de bioraffinage. Identifier des stratégies énergétiques pertinentes pour le site industriel nécessite l'utilisation de méthodes d'analyse efficaces. La référence dans le domaine est l'Analyse de Pincement qui a été conçue dans les années '70 à la suite du choc pétrolier pour la synthèse de nouveaux réseaux d'échangeurs à contact indirect [1-9]. Son succès est dû à sa simplicité et la visualisation au niveau du système. Elle a connu des développements importants, incluant l'analyse au niveau de l'ensemble d'un nouveau site industriel [10]. Cependant des difficultés pour élargir son utilisation sont rencontrées, particulièrement dans les conditions suivantes, qui sont celles du problème de l'intégration du bioraffinage dans les usines papetières : situation de

rétro-installation; interactions étroites entre le réseau d'eau et d'énergie; modernisation des équipements; ajout et modifications majeures d'opérations.

Les besoins d'amélioration méthodologique sont devenus évidents. Au cours des réflexions pour résoudre ces difficultés, plusieurs concepts ont été découverts et une nouvelle méthode d'intégration énergétique par rétro-installation des procédés en général, et qui répond aussi aux besoins de l'industrie papetière, a été conçue.

1.2 Objectifs

L'objectif principal de la thèse est de développer une méthode d'intégration énergétique par rétro-installation des procédés en général, qui puisse être utilisée pour l'identification de modifications dans les échangeurs de chaleur à contact indirect, les transferts directs de chaleur et les opérations de procédé, ainsi que pour l'intégration des usines papetières et des bioraffineries.

Les objectifs spécifiques sous-jacents à cet objectif général sont :

- Développer une méthode de rétro-installation des réseaux d'échangeurs de chaleur à contact indirect basée sur l'analyse de la dégradation de l'énergie transférée des utilités chaudes jusqu'à l'environnement au travers des échanges existants et valider la méthode avec des études de cas, incluant le réseau correspondant à un procédé de pâte kraft.
- Étendre la méthode à la rétro-installation des réseaux impliquant des transferts directs de chaleur et valider avec des études de cas, incluant le système de production d'eau chaude du procédé de pâte kraft.
- Étendre la méthode à l'analyse des opérations de procédé et valider avec des études de cas, incluant l'intégration d'une bioraffinerie et une usine de pâte kraft.

1.3 Organisation de la thèse

Cette thèse, qui a pour titre « *Nouvelle méthode d'intégration énergétique pour la rétro-installation des procédés industriels et la transformation des usines papetières* », est une thèse présentée par articles. Les travaux présentés dans cette thèse sont basés sur quatre articles principaux, situés en annexe.

Le cœur de cette thèse comporte quatre parties principales:

- Le chapitre 2 présente une revue de littérature pertinente au sujet de recherche et identifie des lacunes dans l'ensemble des connaissances revues.
- Le chapitre 3 introduit l'approche méthodologique qui a été suivie au cours du projet.
- Le chapitre 4 présente la synthèse des travaux effectués. Cette section débute avec une présentation générale des articles, et ensuite présente la méthode développée pour l'intégration énergétique.
- Une discussion générale reliée à l'ensemble des travaux et leurs implications est présentée au chapitre 5.

Finalement, le chapitre 6 résume les contributions à l'ensemble des connaissances et apporte des recommandations quant à de futurs travaux possibles.

CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE

Le concept d'intégration énergétique et son langage ont d'abord été développés dans un cadre méthodologique de conception de réseaux d'échangeurs à contact indirect avec pour objectif de réduire les coûts d'énergie. Ce réseau a souvent un impact majeur sur le profil énergétique d'une usine. La première partie de ce chapitre passe en revue les principales approches développées pour la rétro-installation de ceux-ci.

Les interactions entre les réseaux d'eau et d'échangeurs de chaleur sont étroites dans les procédés papetiers. Dans la pratique, l'efficacité énergétique des usines peut souvent être améliorée par des modifications dans le circuit d'eau. La seconde partie présente les principales approches d'analyse des interactions entre les réseaux d'eau et de chaleur.

Quels concepts sont actuellement utilisés pour aborder le problème d'intégration énergétique par rétro-installation ? « Une image vaut mieux que mille mots ». Les concepts sont développés et sont ensuite représentés par une image, un diagramme pour la capture, la compréhension de ceux-ci. Ce besoin de débiller et voir afin de prendre et capturer se retrouve dans le langage. La troisième partie de ce chapitre passe en revue les représentations visuelles des concepts utilisés pour le problème de rétro-installation.

2.1 Méthodes de rétro-installation des réseaux d'échangeurs de chaleur à contact indirect

Les méthodes de rétro-installation peuvent être classées en trois catégories : (1) les approches basées sur la technologie du pincement, l'analyse thermodynamique au niveau du système et le jugement d'ingénierie; (2) les approches combinant l'analyse de pincement et des méthodes d'optimisation numérique; et (3) les méthodes basées sur l'optimisation numérique [11]. Ces différentes approches sont présentées ci-après.

2.1.1 Méthodes basées sur l'analyse de pincement

Tjoe et Linnhof ont été les premiers à proposer une méthode de rétro-installation basée sur l'analyse de pincement [12]. La formule de Bath de l'équation 1 a été développée pour évaluer la surface d'échange minimale nécessaire pour une différence de température d'approche fixée entre les courbes composites chaudes et froides de l'analyse de pincement, HRATD [13]. Les courbes composites sont décomposées en intervalles de températures i à l'intérieur desquels aucun courant ne commence ou se termine. Il est supposé que tous les transferts de chaleur sont verticaux, ce qui conduit à la surface minimale d'échange, ainsi qu'une résistance au transfert nulle au niveau de la paroi séparant les fluides chauds et froids.

$$A_i = \frac{1}{F_i (\Delta T_{lm})_i} \left(\sum_j \frac{Q_{j,i}}{h_{j,i}} + \sum_k \frac{Q_{k,i}}{h_{k,i}} \right) \quad \text{Équation 1}$$

La moyenne logarithmique de la différence de température pour chaque intervalle i , $(\Delta T_{lm})_i$, diminue avec la différence de température d'approche. De la sorte, la surface minimale d'échange est inversement proportionnelle à la différence de température entre les courbes dans chaque intervalle. Par conséquent, la consommation minimale de chaleur pour le réseau et la surface minimale d'échange correspondante peuvent être ciblées. Les auteurs proposent de comparer la surface minimale et la surface d'échange réellement utilisée. Le ratio entre ces deux surfaces est nommé « efficacité d'aire ». Le graphe de différence de température (heat-driving force plot, décrit dans la section 2.3), où les différences de température minimale et existante sont

représentées en fonction de la température des demandes du réseau, permet de diagnostiquer les transferts peu efficaces [14]. Les échangeurs dont l'aire est mal utilisée sont des cibles prioritaires pour des modifications. La courbe d'efficacité constante de surface, représentant le coût d'investissement lié à l'achat de surface d'échange en fonction de la consommation d'énergie thermique, est utilisée pour prédire la surface d'échange nécessaire pour la rétro-installation du réseau et représenter le compromis entre l'économie d'énergie et le coût d'investissement lié à l'ajout de surface d'échange [15].

Une approche préconisée pour réduire la consommation d'énergie consiste à construire un nouveau réseau virtuel par la méthode de conception du pincement (pinch design method) [16-18] après avoir estimé une différence de température d'approche raisonnable, soit par l'expérience soit avec la formule de Bath [19], et ensuite d'essayer d'effectuer un petit nombre de modifications dans le réseau existant afin de le rapprocher du réseau virtuel. L'efficacité d'un échangeur peut être augmentée par exemple en modifiant le débit d'un des deux courants. Les boucles et les chemins refroidisseurs-réchauffeurs sont également exploités afin de réduire le coût d'investissement. Une approche légèrement différente pour reconcevoir le réseau est d'essayer de supprimer un ou tous les transferts traversant le pincement, et de réarranger ensuite le réseau en essayant de garder le plus possible la structure existante. Cette dernière approche est celle proposée dans la méthode Matrix.

Méthode Matrix pour la rétro-installation des réseaux

Comme l'estimation du coût d'investissement lié à la surface d'échange en fonction de la différence de température d'approche HRATD par la formule de Bath est très approximative, surtout en situation de rétro-installation car les échanges dans les réseaux avant et après rétro-installation ne sont généralement pas verticaux et incluent des transferts croisés (criss-cross), la méthode Matrix utilise une approche exploratoire [20-21]. Elle parcourt un large éventail de possibilités pour identifier des solutions acceptables, en diminuant d'une part progressivement la différence de température d'approche HRATD à partir de sa valeur actuelle, d'autre part en éliminant progressivement les échanges traversant le pincement, et enfin, pour chaque HRATD et chaque combinaison d'échanges traversant le pincement supprimés, en identifiant les réarrangements les moins coûteux dans le réseau (Figure 2-1). La procédure d'exploration est en partie automatisée. Un algorithme coupant les branches d'exploration inutiles a été développé et

récemment inséré dans la méthode. Un avantage de cet outil est l'évaluation précise des coûts du réseau après rétro-installation, qui incluent les variables suivantes: la surface d'échange, la distance entre les courants, le type d'échangeur, les équipements auxiliaires, les contraintes d'espace, les coûts de pompage et de maintenance, et l'encrassement des échangeurs. Les relations de Reynolds, Nusserl, Prandtl notamment sont utilisées pour évaluer les pertes de charge, les coefficients de transferts de chaleur et l'encrassement [22-27]. Les résultats de l'évaluation des coûts sont affichés dans une « matrice », un tableau dont les lignes correspondent aux courants chauds et les colonnes des courants froids, d'où le nom de la méthode. En résumé, cette approche se base sur l'analyse de pincement, mais explore un large spectre de possibilités en faisant varier la température d'approche HRATD et en faisant varier les échanges traversant le pincement supprimés, et évalue avec grande précision les coûts du réseau modifié.

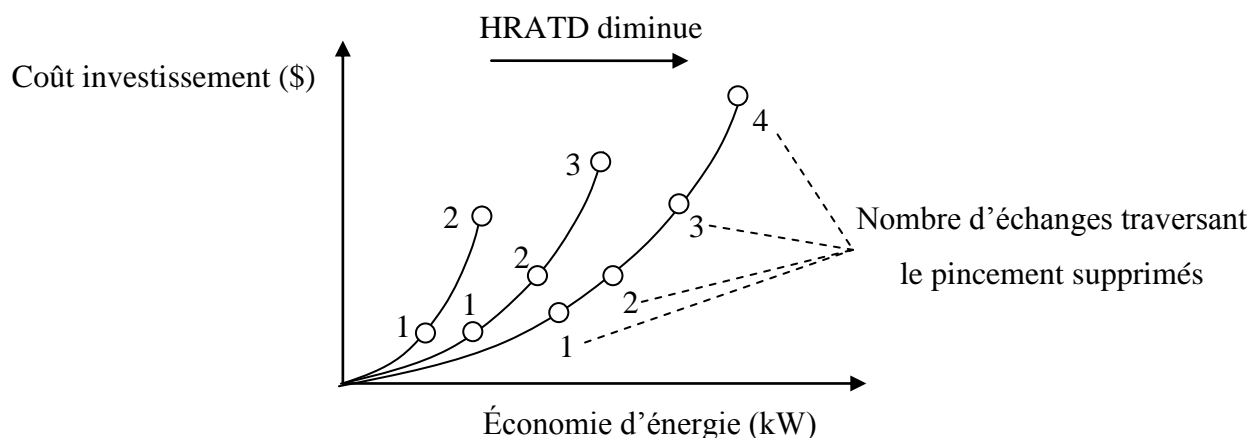


Figure 2-1 Exploration de solutions avec la méthode Matrix.

Approche d'Analyse de Chemins et de Ciblage Structurel

Cette approche permet d'identifier les parties d'un réseau avec un haut potentiel d'économie. Une lacune importante de l'analyse de pincement réside dans le manque d'information sur la façon de réarranger le réseau après avoir supprimé des échanges traversant le pincement.

L'Analyse de Chemin (Path Analysis) [28] et sa version ultérieure, le Ciblage Structurel (Structural Targeting) [29], tentent de cerner les modifications réalisables en pratique en décomposant d'abord le réseau en zones et ensuite en combinant celles-ci en sous-réseaux. Une zone contient un ou plusieurs échangeurs dans le réseau initial. Un échangeur de chaleur doit être inclus dans seulement une zone. Une source ou une demande par contre peut aller d'une zone à une autre. Une zone est une partie du réseau qui peut facilement être intégrée. Par exemple les échangeurs le long d'un chemin refroidisseur-réchauffeur dans le réseau initial peuvent être inclus dans une zone. Une autre possibilité est la proximité géographique de plusieurs échangeurs. Le réseau initial est dans un premier temps décomposé en zones facilement intégrables, selon des règles heuristiques (van Reisen *et al*, 1997). Ensuite ces zones sont combinées entre elles en sous-réseaux, en commençant avec des combinaisons de deux zones, puis trois zones, etc., jusqu'à l'ensemble du réseau. Des règles heuristiques pour former des sous-réseaux à partir des combinaisons de zones sont proposées. Chaque sous-réseau doit inclure au moins un refroidisseur et un réchauffeur. Une zone qui inclut à la fois un refroidisseur et un réchauffeur forme un sous-réseau à elle seule. Chaque sous-réseau est ensuite évalué : sa consommation actuelle est comparée avec celle provenant du ciblage obtenu par l'analyse de pincement du sous-réseau. Les sous-réseaux sont classés selon leur potentiel d'économie d'énergie ou de rentabilité. Les plus prometteurs sont modifiés : les échanges traversant le pincement d'un sous-réseau sont supprimés et les réarrangements subséquents, limités au sous-réseau, sont identifiés.

Les différences entre l'Analyse de Chemins et sa version ultérieure, le Ciblage Structurel, résident en ce que les règles heuristiques pour délimiter les zones sont plus détaillées dans la seconde, et en ce que sa terminologie reflète mieux l'ensemble des projets de rétro-installation dans les sous-réseaux, qui ne se limitent pas aux modifications d'échangeurs le long d'un chemin refroidisseur-réchauffeur ou à la création de nouveaux chemins. Les étapes de l'approche sont résumées à la Figure 2-2.

La logique est celle de l'analyse de pincement. Cependant, au lieu de traiter l'ensemble d'un réseau comme le fait l'analyse de pincement classique, l'approche de Ciblage Structurel permet d'identifier des parties avec un haut potentiel d'amélioration. Le ciblage d'un sous-réseau résultant de la combinaison d'un petit nombre de zones intégrables est plus réaliste, et les projets de rétro-installation concernent seulement une partie du réseau. Deux visions successives sont présentes dans cette approche. La première version, l'Analyse des Chemins, s'était focalisée sur les modifications le long des chemins refroidisseur-réchauffeur et leur création. La seconde version, le Ciblage Structurel, considère l'ensemble des possibilités de rétro-installation avec le principe de ciblage par l'analyse de pincement, mais cette fois pour un sous-réseau.

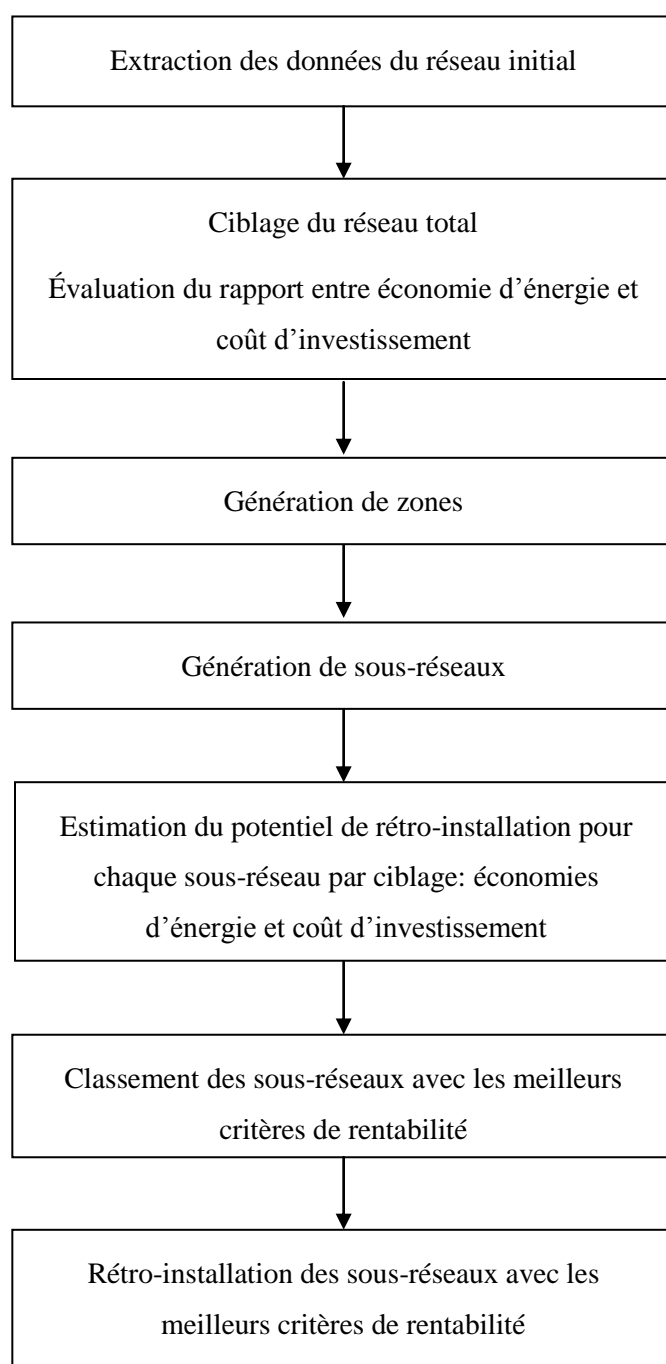


Figure 2-2 Étapes de l'Analyse des Chemins ou Ciblage Structurel

2.1.2 Approche pincement de réseau (network pinch approach)

Cette méthode de rétro-installation de réseau d'échangeurs de chaleur à contact indirect permet d'identifier des solutions intéressantes de réduction de la consommation d'énergie. Elle est interactive, s'appuie à la fois sur des principes d'analyse de pincement et des méthodes d'optimisation numérique. Il n'est pas question d'optimum global ici. Le principe général consiste à utiliser des règles heuristiques afin d'identifier des changements topologiques favorables dans le réseau et de résoudre ensuite un problème d'optimisation sur un espace réduit [30].

Un réseau inclut un « chemin refroidisseur-réchauffeur », tel que défini par la communauté dans le domaine, si un refroidisseur et un réchauffeur sont connectés par des lignes horizontales et verticales dans un diagramme grille. La Figure 2-3 montre un exemple de réseau incluant un chemin refroidisseur-réchauffeur, C-E2-H. Lorsqu'un chemin refroidisseur-réchauffeur existe dans un réseau, il est souvent possible de réduire la consommation d'énergie sans ajout de nouvelles conduites, et parfois même sans ajout d'échangeur; l'ajout de surface à des échangeurs internes peut suffire [31]. Ainsi réduire la consommation d'énergie avec des modifications le long d'un chemin peut correspondre à un coût d'investissement limité.

Lorsque de la surface est ajoutée à des échangeurs internes le long d'un chemin, la différence de température entre la source et la demande dans ceux-ci diminue. La Figure 2-4 représente la situation après ajout de surface à l'échangeur interne E2. La différence de température dans E2 a diminué jusqu'à atteindre la valeur minimale autorisée, égale à 10°C dans notre cas; 20kW ont été économisés. La température d'extrémité froide de la source de l'échangeur interne E2 est égale à 150°C; celle de l'extrémité froide de la demande est égale à 140°C. Ces températures sont nommées « Températures de Pincement Réseau » (Asante et al, 1997). Elles limitent la réduction de la consommation d'énergie sur le chemin refroidisseur-réchauffeur. La réduction de consommation d'énergie par simple ajout de surface dans beaucoup de situations atteint une limite due à la différence minimale autorisée de température dans un échangeur. Pour aller plus loin dans la réduction de consommation, un changement topologique est nécessaire. L'approche du Pincement de Réseau consiste à supprimer un transfert de chaleur traversant les températures de pincement du réseau, utiliser la source rendue ainsi disponible pour chauffer une demande le long du chemin au-dessus du pincement réseau, et satisfaire la demande correspondante par de la

chaleur d'une source le long du chemin en-dessous du pincement réseau. Dans notre exemple, l'échangeur E1 traverse le pincement réseau. La source de l'échangeur E1 peut être utilisée pour chauffer une demande au-dessus du pincement le long du chemin; la demande de l'échangeur E1 peut être chauffée par une source de long du chemin en dessous du pincement. La Figure 2-5 présente la situation après une telle modification topologique. Une fois la topologie du réseau fixée, la conception finale, est effectuée en résolvant un problème d'optimisation de type NLP; à cette étape, l'économie d'énergie, les charges thermiques, les températures et la surface des échangeurs du sous-système composé du chemin sont évaluées [32].

La Figure 2-6 présente les étapes de l'approche Pincement de Réseau. L'objectif est d'identifier une solution raisonnable réduisant la consommation d'énergie par modification du réseau initial. Si aucun chemin refroidisseur-réchauffer n'est présent dans le réseau initial, l'utilisation de règles heuristiques permettant d'en créer est proposée [33]. Le pincement réseau est ensuite identifié. Si des échanges de chaleur traversant le pincement réseau peuvent être identifiés, un diagnostic des modifications topologiques possibles est effectué en résolvant un problème d'optimisation de type MILP; la fonction objectif représente la capacité d'économie d'énergie; les variables binaires représentent les modifications topologiques; la surface d'échange n'est pas encore considérée à cette étape. Si par contre aucun échangeur ne traverse le pincement réseau, l'utilisation de règles heuristiques est proposée afin d'identifier des modifications topologiques qui peuvent conduire à une réduction de consommation d'énergie. Lorsque la topologie du réseau est fixée, les variables continues telles que la température, la surface d'échange et l'économie d'énergie sont évaluées par optimisation du type NLP.

Cette approche ne recherche pas d'optimum global mais permet d'identifier des solutions pour la réduction de consommation d'énergie qui sont raisonnables. Elle a l'avantage d'être interactive en permettant à l'utilisateur de choisir parmi plusieurs modifications topologiques, et d'utiliser l'optimisation dans la phase finale pour évaluer les variables continues. Cette méthode est celle la plus souvent utilisée dans les logiciels de rétro-installation de réseaux d'échangeurs de chaleur. Pourtant dans des situations, même simples, l'approche pincement réseau n'identifie pas les modifications pertinentes. De nouvelles règles heuristiques ont été développées afin de réduire le nombre de situations où l'approche n'est pas efficace [34].

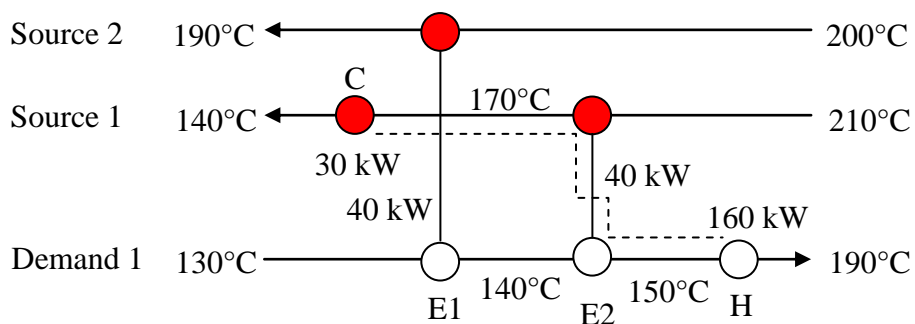


Figure 2-3 Exemple de réseau avec un chemin refroidisseur-réchauffeur

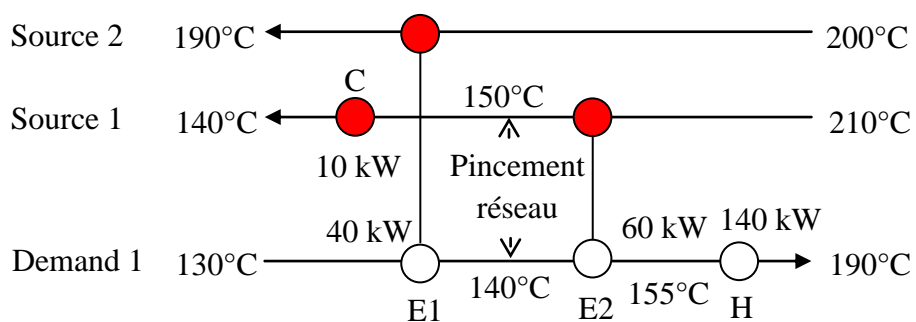


Figure 2-4 Réseau après ajout de surface et sans modification topologique

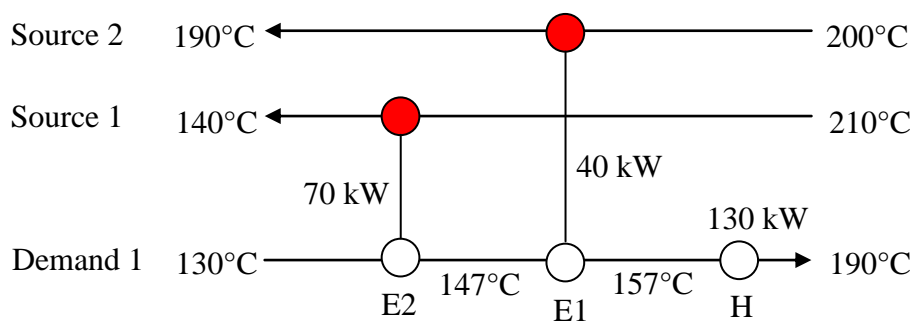


Figure 2-5 Réseau final correspondant à la consommation minimale d'énergie

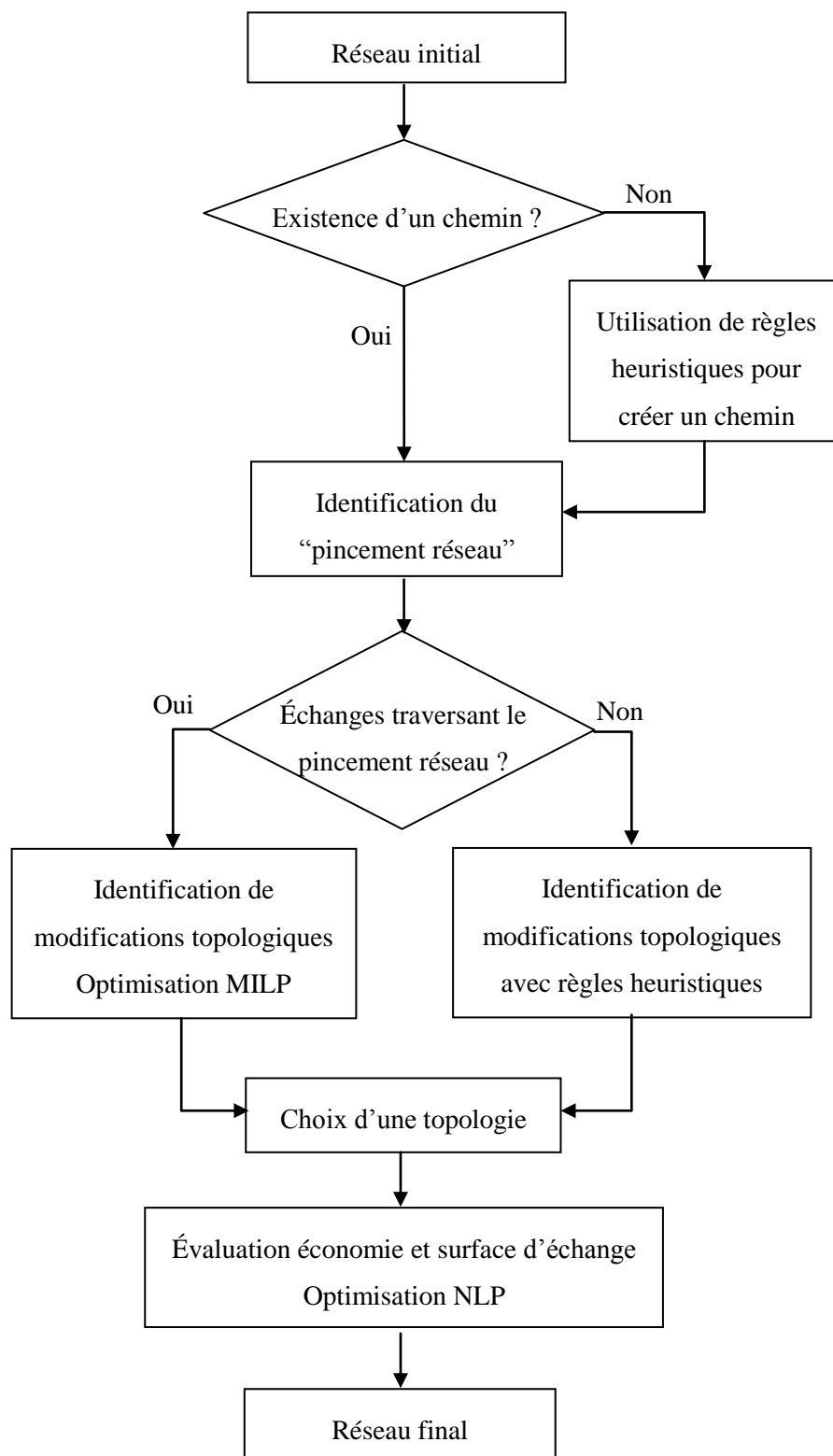


Figure 2-6 Approche du Pincement de Réseau

2.1.3 Approches d'optimisation numérique

La rétro-installation des réseaux d'échangeurs de chaleur est fondamentalement un problème du type MINLP (Mix Integer Non-Linear Programming). Les principales variables continues désignent les débits massiques, températures, surfaces d'échange et transferts de chaleur dans les échangeurs. Les non-linéarités viennent surtout du fait que le transfert de chaleur dépend d'une part du produit du débit massique et de la température (bilinéarité), et d'autre part du produit entre la surface d'échange et la moyenne logarithmique des différences de température entre les courants chauds et froids. Même en intégrant seulement les variables continues dans le problème, la fonction de coût à minimiser (ou de profit à maximiser) présente de nombreux optima locaux. Les variables entières désignent les décisions (binaires) de modifier ou non un échangeur, de le déplacer, ou bien d'en acheter. Les décisions de rétro-installation varient selon le réseau déjà installé, l'environnement économique et les contraintes de procédé. Beaucoup d'efforts ont été tentés afin de résoudre le problème de rétro-installation des réseaux avec l'aide d'une superstructure représentant l'ensemble des possibilités de modification, qui correspond à une formulation MINLP. De nombreuses difficultés de convergence vers l'optimum global ont été rencontrées. Dès lors, le problème a souvent été abordé de façon séquentielle, en décomposant l'approche en plusieurs étapes et en évaluant différentes solutions par itération.

Ciric et Floudas [35] proposent de choisir une différence de température d'approche entre les courbes composites chaudes et froides (HRATD), déterminer la température de pincement et le minimum de demande énergétique correspondants, séparer le réseau existant au-dessus et en dessous du pincement, et ensuite de déterminer les modifications dans le réseau qui minimisent le coût d'investissement et respecte la contrainte de consommation d'énergie ciblée avec une formulation MILP qui utilise le modèle de transbordement pour les transferts de chaleur (Figure 2-7). Le modèle inclut aussi les différents types de ré-assignement d'échangeurs : changement des courants chaud et froid, changement d'un seul des deux courants, pas de changement d'identité des courants mais modification de l'ordre de succession. L'étape suivante consiste à évaluer les variables continues avec un modèle NLP, où la contrainte de différence minimale de température est relâchée, la température devenant une variable. La prédétermination de la consommation d'utilité force un coût artificiel d'investissement lié aux échangeurs de chaleur et empêche d'évaluer le profit maximal; de plus les solutions peuvent être coincées dans des optima locaux [36]. Yee and Grossmann proposent un ciblage de consommation d'utilités à partir d'une

différence de température d'approche, de séparer le réseau en deux parties au niveau du pincement et ensuite d'identifier les réarrangements par une approche en deux étapes [37]. La première consiste à une présélection de projets potentiels de rétro-installation économiquement intéressants à partir d'une formulation MILP. Les projets présélectionnés étaient ensuite déterminés en détail en utilisant une superstructure correspondant à une formulation MINLP. Cette approche est limitée aux réseaux de taille modeste, et présente l'inconvénient de solutions coincées dans des optima locaux [38-39].

Furman et Sahinidis [40] ont montré que le problème de conception de réseaux d'échangeurs de chaleur est « NP hard » (Non Polynomial time deterministic hard problem), que ce soit pour des situations de synthèse de nouveaux réseaux ou de rétro-installation de réseaux existants, avec des approches séquentielles ou simultanées. Ils suggèrent que l'utilité des méthodes déterministes est limitée et que les approches stochastiques, telles que « Simulated Annealing » (SA), « Tabu Search » (TS), et les algorithmes génétiques (GA), sont plus efficaces pour ce type de problème.

Les méthodes stochastiques ont d'abord été utilisées par Athier *et al.* [41], qui couplèrent l'approche SA avec une méthode NLP. Les variables structurelles étaient modifiées par SA, les variables continues étaient traitées avec le modèle NLP. Parce que l'approche SA ne peut couvrir l'espace de solutions entièrement, cette procédure devait être répétée à de nombreuses reprises. De plus des problèmes de convergence étaient rencontrés lors de la détermination des variables continues à l'étape NLP. Bochenek et Jezowski [42] et Jezowski *et al.* [43] ont proposé une approche basée sur le concept de pincement de réseau et l'utilisation d'un algorithme génétique. Après le choix de différence de température d'approche, le ciblage du minimum de la consommation d'énergie et la détermination du pincement, le réseau était séparé en deux parties. Dans les deux parties, tant les variables binaires que continues étaient identifiées avec l'approche GA. L'approche GA donnait satisfaction pour l'identification des variables binaires, mais pas pour l'identification de celles continues. Cette approche était très lente, nécessitant près d'une demi-journée pour traiter un réseau de petite taille. Parce que l'approche GA pour l'optimisation structurelle semblait satisfaisante, du fait de sa nature discrète et de sa capacité à parcourir un large espace de solutions sans être coincée dans des optima locaux, Rezaei et Shafiei [44] ont tenté de résoudre le problème de rétro-installation de réseaux d'échangeurs de chaleur en combinant les approches GA, NLP et ILP (Integer Linear Programming). Les modifications structurelles dans le réseau étaient identifiées par GA. Le réseau était décomposé en gènes, dont

le nombre était légèrement supérieur au nombre d'échangeurs du réseau initial. Une population de 20 à 40 réseaux différents pour un réseau initial de petite taille était identifiée au départ par des modifications aléatoires ou suggérées. Les chromosomes qui donnaient de bons résultats étaient favorisés, se retrouvant dans les générations postérieures (élitisme). Des gènes étaient échangés entre chromosomes (cross-over). Des gènes étaient modifiés (mutation) en changeant l'adresse des échangeurs. Les variables continues qui minimisent la consommation d'énergie étaient évaluées avec une formulation NLP. Un problème ILP était ensuite résolu pour déterminer le coût minimal d'investissement des modifications par la réutilisation des échangeurs ou l'achat de nouveaux. La stratégie est présentée à la Figure 2-8.

La plupart des méthodes abordent le problème de rétro-installation en utilisant une procédure de décomposition. Barbaro *et al* [45] proposent une approche sans décomposition basée sur une formulation MILP à partir du modèle de transport pour évaluer les transferts de chaleur. Dans le modèle de transport, la température n'est pas une variable mais un paramètre du débit de chaleur transféré entre un intervalle de température du courant chaud et un intervalle de température du courant froid [46]. Leur modèle requiert un temps de calcul de plusieurs heures pour atteindre les conditions proches de l'optimalité dans le cas d'un réseau de taille moyenne. Dans leur conclusion, les auteurs proposent d'utiliser leur approche après identification de projets prometteurs à l'aide d'autres méthodes, qui montreraient les endroits où chercher la solution. Ils suggèrent ainsi l'utilisation d'heuristiques, telles que celles utilisées dans l'approche pincement de réseau, ou de diagrammes pour une première phase de diagnostic.

Les principaux inconvénients des méthodes numériques sont les suivants : elles courent le risque de proposer une solution piégée dans un optimum local; elles requièrent l'intervention de spécialistes en optimisation; elles sont complexes, impliquent des simplifications/limitations dans le modèle; elles présentent des problèmes de convergence et le temps de calcul est long même pour des réseaux de petite taille.

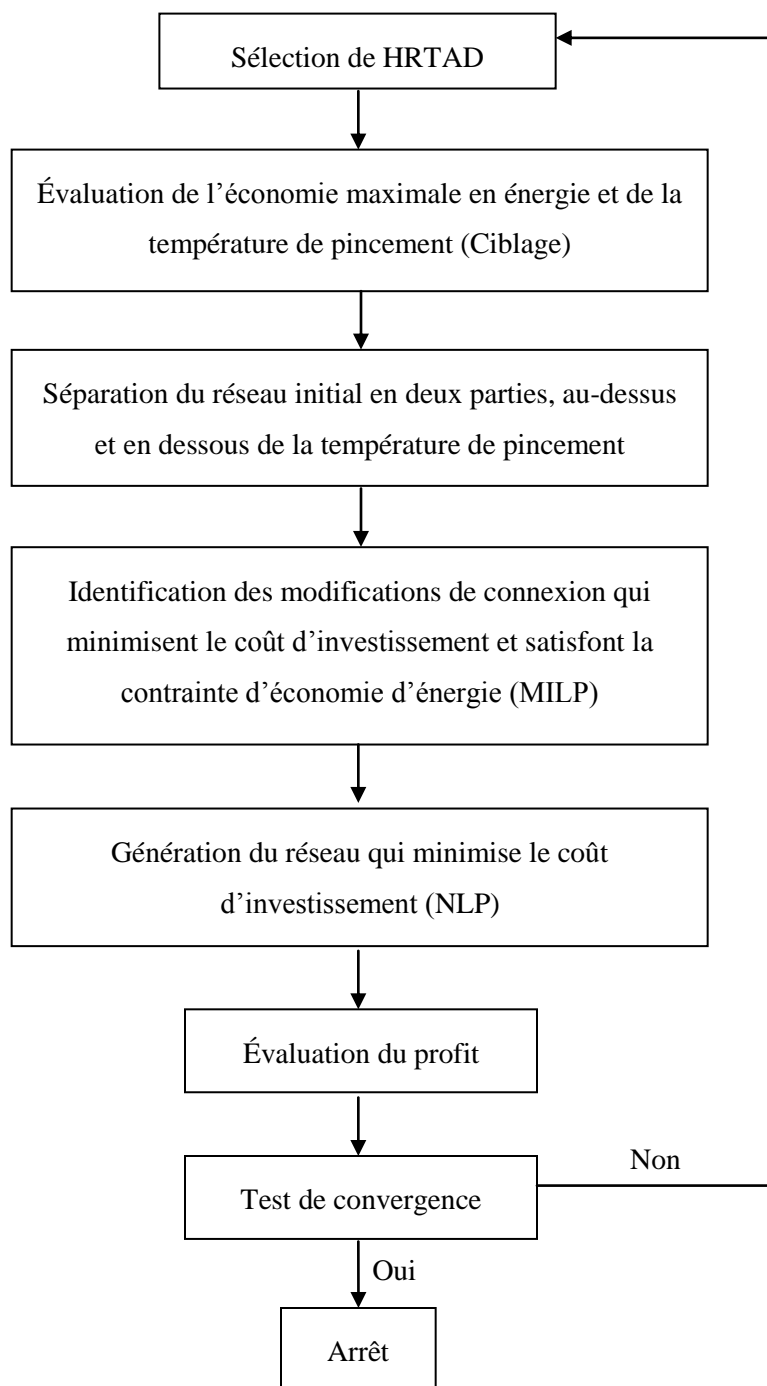


Figure 2-7 Stratégie proposée par Ciric et Floudas

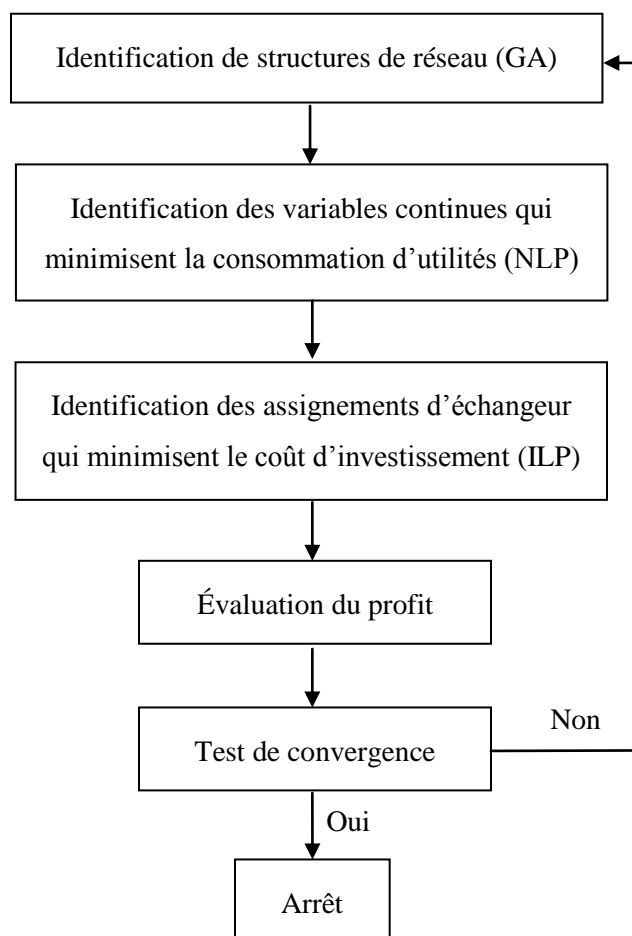


Figure 2-8 Stratégie proposée par Rezaei et Shaffiei

2.1.4 Analyse critique

Des difficultés d'utilisation de la méthode du pincement dans l'industrie papetière sont rencontrées. La situation de rétro-installation rend l'application de la méthode plus difficile car celle-ci considère dans la définition du problème seulement les sources et demandes en chaleur du procédé, et non comment celles-ci sont gérées dans le réseau existant (à l'exception des courbes composites avancées qui incluent des données sur les réchauffeurs et refroidisseurs actuels et seront décrites dans la section 2.3) ni les contraintes spécifiques à chaque connexion. Les informations fournies par la méthode de pincement se limitent à une valeur cible d'économie d'énergie et une température de pincement au travers de laquelle les échanges devraient être supprimés. Les économies de consommation de chaleur évaluée par ciblage peuvent rarement être atteintes dans la réalité. La façon de réorganiser l'ensemble du réseau après la suppression d'échanges traversant le pincement n'est aucunement précisée.

L'Approche Pincement de Réseau permet d'identifier une solution raisonnable conduisant à une réduction de la consommation d'énergie dans certaines situations. Il ne s'agit pas d'identifier un optimum global mais bien d'utiliser d'un ensemble de règles heuristiques afin d'identifier des modifications topologiques, et ensuite d'utiliser l'optimisation quand la topologie est fixée afin d'évaluer la charge thermique et la surface des échangeurs et l'économie d'énergie. L'approche rencontre des difficultés même dans des situations simples; de nouvelles règles heuristiques ont été développées afin de réduire le nombre de situations où l'Approche Pincement de Réseau ne peut trouver de solutions satisfaisantes [34].

Les approches numériques d'optimisation sont complexes, même pour les petits réseaux, et ne garantissent pas l'optimalité. Elles sont d'ailleurs peu utilisées. Ceci suscite la question suivante : les formulations devraient-elles être améliorées en y incluant plus de connaissances au niveau de la thermodynamique ?

2.2 Méthodologies d'analyse des interactions entre les réseaux d'eau et de chaleur

Cette section débute par une description de l'importance des interactions entre les réseaux d'eau et de chaleur dans les usines papetières. Ces interactions ont suscité le développement d'outils méthodologiques pour la conception des circuits d'eau et des réseaux d'échangeurs de chaleur correspondants. Les approches de conception ci-dessous sont présentées dans ce chapitre :

- « L'analyse de pincement modifiée » conçue pour l'identification des programmes de réduction de la consommation d'eau et d'énergie dans les usines papetières
- « La méthodologie unifiée » qui combine différentes techniques d'intégration telles que le pincement thermique, le pincement massique et l'analyse exergetique, afin d'améliorer l'efficacité énergétique des usines papetières
- « L'approche d'optimisation combinée eau et énergie, C.E.W.O. », qui identifie les opportunités de réduction de la consommation d'énergie en considérant les inefficacités liées au réseau d'eau
- Une méthodologie de conception de nouveaux circuits d'eau et réseaux correspondants d'échangeurs de chaleur
- La technique de modification des courbes composites pour la conception de réseaux simplifiés d'échangeurs de chaleur par l'identification de mélanges d'eau

2.2.1 Interactions des réseaux d'eau et énergie dans l'industrie papetière

L'efficacité énergétique des procédés papetiers est étroitement liée aux réseaux d'eau et de chaleur [47-50]. Les mélanges non-isothermes, dans lesquels l'eau est souvent impliquée, sont des sources de dégradation de la qualité de l'énergie. L'eau est utilisée pour la dilution, le lavage, le refroidissement et la production de vapeur, et est le principal transporteur et dissipateur d'énergie. La chaleur de la vapeur des utilités chaudes est utilisée pour satisfaire les besoins thermiques de l'usine et est ensuite évacuée principalement par les effluents liquides. Réduire la consommation d'eau a pour effet de diminuer la dégradation de la chaleur, la consommation de vapeur et l'aire requise dans les échangeurs à contact indirect [51-55].

La gestion appropriée des réservoirs d'eau et de filtrats conduit à des économies d'énergie. Un bon contrôle des inventaires d'eau doit considérer les aspects dynamiques du procédé tels que le système de réacteurs en discontinu (batch) ou la casse de la feuille de papier au niveau de la machine [46].

En hiver la consommation de vapeur augmente, principalement du fait de la diminution de la température de l'eau et de l'air. Bien que la température de l'environnement soit inférieure à celle du pincement, la chaleur en excès (c'est-à-dire située sous le pincement) n'est pas récupérée car cela impliquerait l'ajout d'échangeurs à contact indirect. Dans les usines où la consommation d'eau est élevée, la consommation de vapeur peut augmenter de 10% en hiver [56].

La majorité des échanges de chaleur traversant le pincement dans un procédé de pâte kraft sont liés au système de production d'eau chaude [57]. Dans une usine typique scandinave, environ 1GJ/ADt de chaleur peut directement être économisé par le réaménagement de ce système. Des études ont montré également que de la chaleur en excès au-dessus de 80°C et en-dessous du point de pincement peut devenir disponible après modification du réseau d'eau dans une usine typique. La quantité et température de cette chaleur en excès augmente lorsque la consommation d'eau diminue [58, 59]. L'excès de chaleur au-dessus de 80°C varie de 1 à 2 GJ/ADt quand la consommation d'eau de procédé est réduite de 25 à 18m³/ADt. Cette chaleur peut théoriquement être utilisée pour l'évaporation de la liqueur noire avec le système PIVap, le chauffage du district, ou bien alimenter une pompe à chaleur [60, 61] ou un bioprocédé. Dans la pratique, cette chaleur en excès est déjà utilisée pour la production d'eau chaude et tiède dans une usine. Les courbes de réservoir ont été développées afin de rendre disponible la chaleur en excès [62]. Elle implique la construction de la courbe composite chaude résultant des courants chauds disponibles pour le réseau d'eau et de la courbe composite froide résultant des demandes en eau. La courbe composite froide est ensuite déplacée vers la gauche sur le diagramme de pincement jusqu'à atteindre une différence de température entre les deux courbes permise par l'industrie. La quantité de chaleur en excès théoriquement disponible à haute température est alors déterminée. La courbe des réservoirs est finalement construite entre les deux courbes selon la technique de modification des courbes composites (décrite ci-après) afin de minimiser le nombre de réservoirs et d'échangeurs de chaleur.

2.2.2 Analyse de pincement modifiée

Cette méthodologie a été développée initialement pour des usines de papier journal afin d'identifier des programmes de réduction de la consommation d'eau et d'énergie [63, 64]. L'analyse comprend trois phases : identification de projets en pâtes et papiers par une étude de procédé; identification d'échanges de chaleur directs par mélange ou recirculation en utilisant une analyse de pincement modifiée; identification d'échanges de chaleur indirects par une analyse de pincement classique. L'étude de procédé permet d'identifier des projets qui ne sont pas détectés par l'analyse de pincement, tels que des changements d'équipements ou la récupération de la chaleur dissipée par des pompes à vide. L'analyse de pincement modifiée de la seconde phase identifie les opportunités de mélange ou recirculation en examinant les courbes composites chaudes et froides et en comparant les températures aux extrémités des courants chauds avec celles des courants froids. Les extrémités correspondent aux points de pli (kink points) des courbes composites; deux points de pli situés à une température identique peuvent indiquer une opportunité de recirculation ou mélange (Figure 2-9). Si les températures d'extrémité chaude d'un courant chaud et courant froid sont proches, une opportunité de recirculation est possible. Il en est de même si les températures d'extrémité froide d'un courant chaud et courant froid sont proches. Lorsque les températures finales (target) d'un courant chaud et courant froid sont ou proches, une opportunité de mélange est possible. L'analyse modifiée inclut les étapes ci-dessous :

- Extraction des courants à partir de la simulation du procédé en considérant les projets identifiés par l'étude de procédé de la première phase.
- Génération des courbes composites d'échange direct à partir des températures aux extrémités des courants, application de règles de conception reliées au procédé et à des facteurs techno-économiques afin de sélectionner les échanges par mélange de courants et les opportunités de recirculation.
- Évaluation des projets, incluant la simulation du procédé modifié.

La troisième phase consiste à une analyse de pincement classique : extraction de données à partir de la simulation incluant les projets identifiés aux phases précédentes; génération des courbes composites chaudes et froides et positionnement de celles-ci selon une différence de température correspondant à des échanges indirects; application des règles de conception reliées au procédé et à des facteurs techno-économiques afin de sélectionner de nouveaux échanges de chaleur

indirects; évaluation des projets d'échanges de chaleur indirects, incluant la simulation du procédé modifié.

Les projets identifiés lors de l'analyse en trois phases sont ensuite organisés en programme cohérent de réduction simultanée de la consommation d'eau et d'énergie dans le but d'évaluer les aspects énergétiques des routes technologiques menant à l'effluent-zéro.

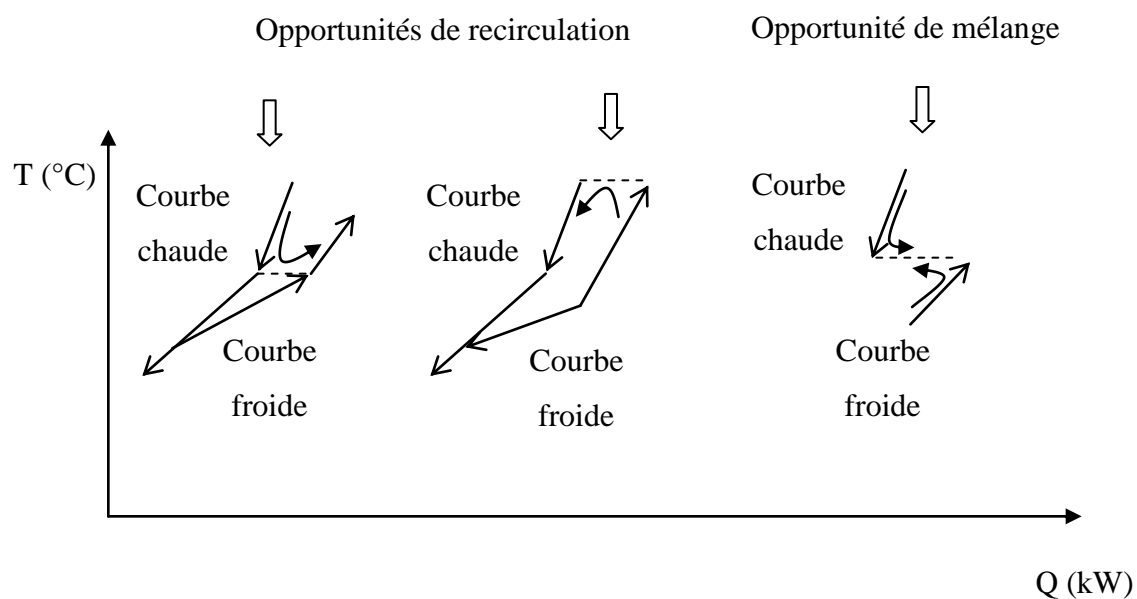


Figure 2-9 Identification de projets eau par l'analyse de pincement modifiée

2.2.3 Optimisation combinée eau et énergie (C.E.W.O.)

L'objectif de cette approche est d'identifier les opportunités de réduction de la consommation d'énergie en considérant les inefficacités liées au réseau d'eau. L'ajout d'eau à un réservoir, la pâte ou une solution chimique a souvent un effet de variation de température qui a son tour affecte la consommation d'énergie ailleurs dans le procédé. Dans l'analyse de pincement classique, seulement les courants de procédé associés aux échangeurs de chaleur existants et quelques courants de sortie avec un haut potentiel de récupération de chaleur, par exemple des effluents, sont considérés, tandis que l'énergie échangée lors des transferts directs par des mélanges n'est pas prise en compte. L'approche d'optimisation eau et énergie (Combined Energy and Water Optimisation) développée par Ressources Naturelles Canada [65] évalue explicitement les inefficacités par mélanges de courants et permet d'identifier des projets de modification du réseau d'eau et d'échangeurs de chaleur (Figure 2-10)

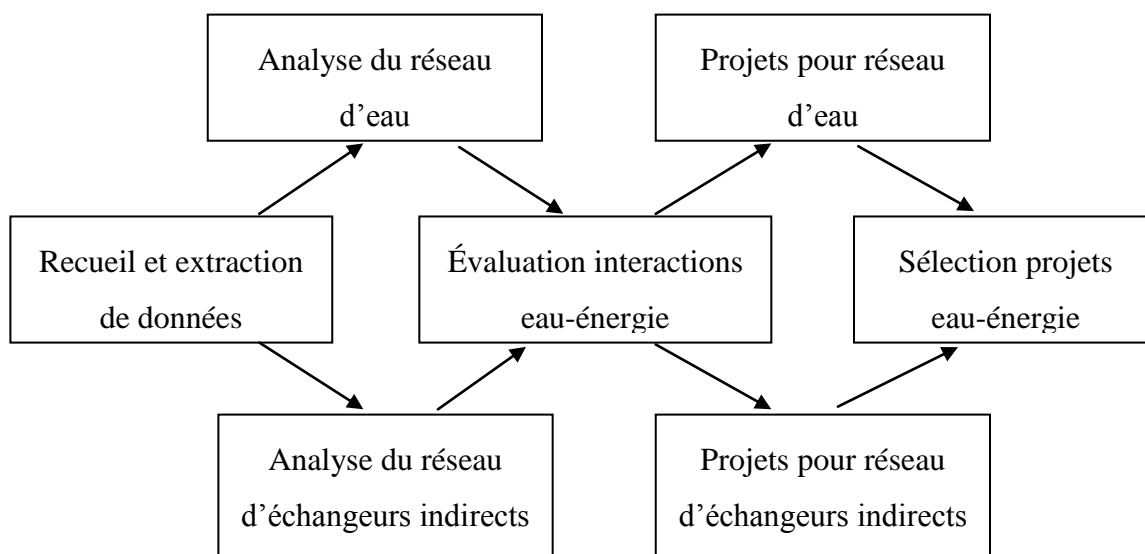


Figure 2-10 Étapes principales de la méthodologie C.E.W.O.

Trois courbes composites froides relatives à l'eau sont proposées (Figure 2-11). La courbe composite froide du réseau correspond à l'ensemble des courants d'eau froids, c'est-à-dire eau de procédé, ajout aux réservoirs, eau pour le scellement des pompes et eau de refroidissement. La courbe composite froide des réservoirs inclut tous les courants entrant dans les réservoirs d'eau. La courbe froide de procédé inclut l'eau requise pour le lavage de la pâte, les douches pour le blanchiment, la presse de la machine à papier, les dilutions, les mélanges non isothermes, etc. L'interprétation de ces courbes composites permet d'évaluer les impacts énergétiques des projets de modification du circuit d'eau. Le rapport eau de refroidissement sur eau de procédé est évalué afin d'identifier la priorité à accorder aux types de projets de réduction de consommation d'eau. Si le débit d'eau de refroidissement est supérieur celui d'eau de procédé, la réduction du débit d'eau de refroidissement devrait être effectuée en premier; dans le cas opposé, le débit d'eau de procédé devrait être réduit en priorité.

Dans l'approche du C.E.W.O. l'extraction de données est modifiée afin de tenir compte des données du réseau existant. [66] Elle permet de mieux définir les besoins et sources du procédé, la façon dont ceux-ci sont gérés dans le procédé, ce qui peut mener à des économies d'énergie plus importantes. Un exemple de projet identifié par cette méthode et non détecté par l'analyse de pincement classique est présenté à la Figure 2-12. L'extraction de données selon la méthode de pincement identifie seulement un courant froid devant être chauffé de 89 à 130°C, et en conséquence les opportunités de réduction de la consommation d'énergie sont limitées aux sources de chaleur supérieure à 130°C. Par contraste l'analyse du réseau de transferts directs de chaleur selon l'approche C.E.W.O. identifie un nouveau courant froid à 40°C qui peut être chauffé par des sources de chaleur résiduelles à température inférieures, ce qui permet de réduire la consommation de vapeur au réchauffeur [67].

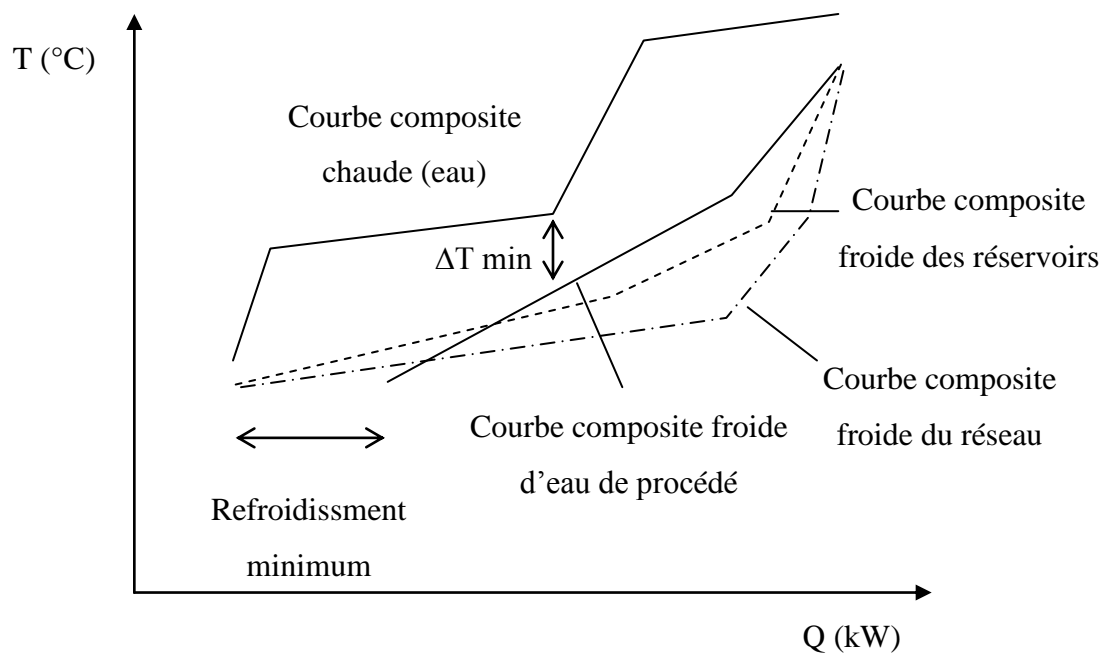


Figure 2-11 Courbes composites relatives à l'eau dans l'approche C.E.W.O.

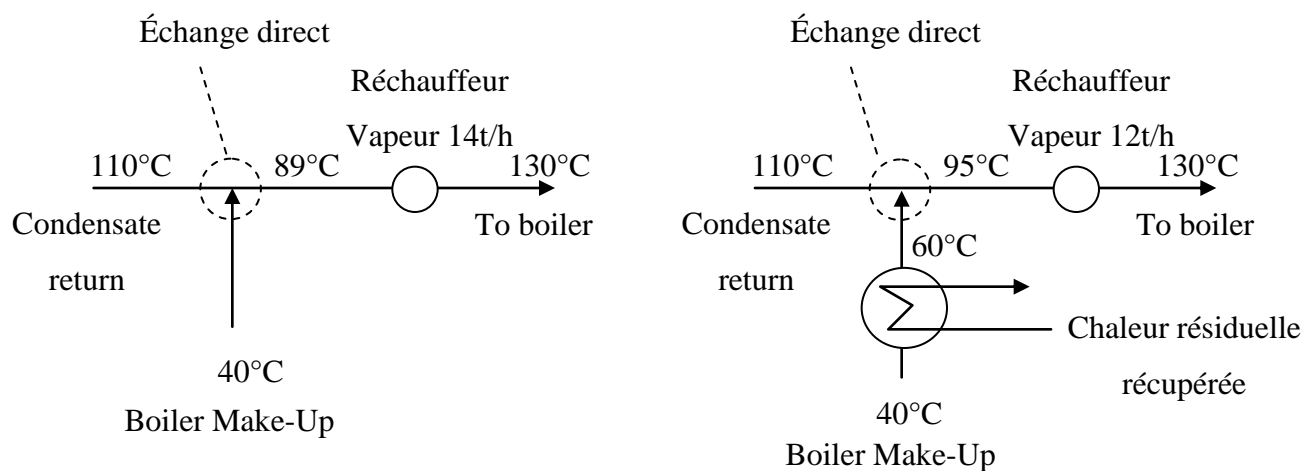


Figure 2-12 Projet identifié par l'approche C.E.W.O.

2.2.4 Méthodologie unifiée d'analyse énergétique

Cette approche combine différentes techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique utilisées dans l'industrie papetière en situation de retro-installation: diagnostic du système d'utilités, technologie du pincement thermique et massique, et analyse exergetique [68, 69]. La méthodologie inclut cinq étapes afin d'identifier un programme qui considère les interactions entre les projets ainsi que leurs contraintes techniques et économiques.

La première étape est la définition du cas de base. La procédure proposée inclut la collection des données, l'élaboration du diagramme de base, l'analyse du système d'utilités et la simulation du procédé. Le diagramme de base est construit à partir des données sur le procédé papetier, le circuit d'eau et le circuit de vapeur. L'analyse des utilités considère la production et consommation de chaleur et d'électricité, l'efficacité de la bouilloire, la consommation de combustible, les pressions de vapeur, le chauffage direct et indirect du procédé, le taux de récupération des condensats et le préchauffage de l'eau pour la bouilloire. L'analyse du réseau d'eau inclut le circuit de refroidissement, l'eau utilisée pour le lavage, l'eau filtrée et déminéralisée pour la production de vapeur et les variations saisonnières.

La seconde étape consiste à comparer le cas de base avec d'autres usines afin d'identifier des inefficacités et identifier les directions générales d'amélioration d'efficacité. Il sera dès lors possible d'estimer les économies potentielles, mais les mesures correspondantes ne seront pas encore identifiées. La comparaison nécessite la compilation de données, l'utilisation d'indicateurs de performance et le ciblage en utilisant l'analyse de pincement thermique et massique. Les pertes d'énergie et d'exergie dans les effluents liquides et gazeux notamment sont utilisées comme outils de diagnostic [70, 71]. Les bilans d'exergie et le diagramme de Sankey sont établis pour les principales opérations de procédé. L'évaluation de la consommation minimale d'eau et de vapeur est effectuée à partir des courbes composites. Une différence de température de 10°C entre les courbes est souvent choisie pour le ciblage énergétique des usines papetières.

La troisième étape inclut l'analyse des interactions en incorporant six techniques d'amélioration énergétique d'une manière structurée afin d'utiliser des effets de synergie. Ces techniques sont les suivantes : augmenter la récupération de chaleur interne avec des échanges à contact indirect; augmenter la réutilisation d'eau; supprimer des mélanges non-isothermes; augmenter la qualité de l'énergie avec une pompe à chaleur; augmenter la récupération des condensats, et adapter la

conversion de l'énergie au niveau de la turbine. Les échanges de chaleur traversant le pincement sont identifiés et supprimés lors de la phase de récupération de chaleur interne. L'analyse de pincement massique est utilisée pour identifier des projets de fermeture de circuit d'eau [72]. Les mélanges non-isothermes impliquent souvent des courants d'eau; leurs effets sont évalués avec les pertes exergetiques et l'analyse de procédé. Comme l'augmentation de la qualité de l'énergie avec une pompe à chaleur requiert un investissement élevé, elle est évaluée seulement après les trois premières phases. La meilleure option pour l'utilisation d'une pompe à chaleur requiert une source ou une demande de chaleur près du point de pincement. Une source possible de chaleur souvent identifiée pour une pompe à absorption est un effluent liquide du blanchiment de la pâte, qui pourrait être utilisée après passage au travers de la pompe pour l'évaporation de la liqueur noire, au dé-aérateur, pour la production d'eau chaude ou pour chauffer l'eau blanche. Ces quatre techniques ensemble déterminent le potentiel d'économie de chaleur et d'eau. Une fois appliquées, la récupération des condensats est examinée et éventuellement améliorée afin de réduire la consommation de vapeur pour le préchauffage de l'eau alimentant la bouilloire. Finalement le système d'utilités est analysé. Une partie de la capacité de production de vapeur peut être disponible pour la production d'électricité par une turbine.

Les deux dernières étapes consistent à appliquer la stratégie d'amélioration d'efficacité énergétique et à comparer les nouvelles performances avec d'autres usines. Des exemples communs de projets sont le remplacement d'injecteur de vapeur par un échangeur de chaleur pour le chauffage de l'eau blanche, l'augmentation de la récupération de condensats, la réutilisation d'effluents de la section d'évaporation de la liqueur noire pour le lavage de la pâte ou la section de recaustification, la réutilisation d'eau blanche pour le lavage de la pâte au niveau du blanchiment, la réutilisation des filtrats au niveau du blanchiment, la réutilisation de l'eau de scellement des pompes à vide et le préchauffage de l'eau fraîche avant le dé-aérateur.

L'analyse des interactions entre les circuits d'eau et d'énergie est le cœur de la méthodologie. Il a été démontré que l'intensification de la réduction de la consommation d'eau a pour résultat un potentiel d'économie de vapeur fraîche plus élevé et une surface d'échange plus petite que dans le cas où seulement la récupération de chaleur interne par des échanges à contact indirect est considérée [51]. Les opérations inefficaces sont identifiées en évaluant l'exergie détruite. L'utilisation d'indicateurs de performance relatifs à l'énergie, l'exergie et l'eau permet d'identifier les endroits où des changements devraient être effectués [73].

2.2.5 Méthodologie de conception des circuits d'eau et des réseaux correspondants d'échangeurs de chaleur

Les réseaux d'eau et d'énergie étant étroitement liés, il est important de considérer les implications énergétiques d'un circuit d'eau dès la phase de conception de celui-ci [74]. Une méthodologie a été développée pour la synthèse de nouveaux circuits d'eau satisfaisant aux contraintes d'opération en débit d'eau, concentration en contaminants dans l'eau et température et pour la synthèse des réseaux d'échangeurs de chaleur correspondants [75]. Il est supposé que la consommation minimale d'énergie implique une consommation minimale en eau dans les conditions suivantes: le débit d'eau liquide sortante est égal au débit d'eau entrante; des échangeurs de chaleur peuvent être utilisés pour réduire la consommation d'énergie ; la température de l'eau sortante est supérieure ou égale à une valeur minimale ΔT_{\min} afin de limiter le coût de la surface d'échange dans les échangeurs à contact indirect. L'équation 2 montre que dans ce cas la consommation minimale en énergie thermique Q_{\min} coïncide avec la consommation minimale en eau F_{\min} .

$$Q_{\min} = F_{\min} * C_{p_{\text{eau}}} * \Delta T_{\min} \quad \text{Équation 2}$$

Le principe de cette méthodologie consiste à évaluer la consommation minimale en eau dans l'ensemble d'opérations, typiquement avec la méthode de pincement massique [76-80], à concevoir ensuite plusieurs réseaux d'eau à consommation minimale d'eau avec un diagramme-grille bidimensionnel, et ensuite concevoir pour chaque réseau d'eau à consommation minimale un réseau d'échangeurs de chaleur avec la technique de modification des courbes composites [81]. Comme plusieurs réseaux d'eau peuvent correspondre à une consommation minimale en eau et que pour chaque réseau d'eau plusieurs réseaux d'échangeurs de chaleur conduisant à des coûts d'énergie et d'investissement différents peuvent être conçus, l'utilisation d'un diagramme-grille bidimensionnel et d'une technique de modification des courbes composites est proposée. La procédure générale de conception des réseaux d'eau et des réseaux correspondants d'échangeurs est reprise ci-dessous.

Procédure proposée pour la conception des réseaux d'eau et d'échangeurs :

1. Évaluation de la consommation minimale d'eau, typiquement avec la technique du pincement massique
2. Conception de plusieurs réseaux d'eau correspondant à une consommation d'eau minimale à partir du diagramme-grille bidimensionnel (température-concentration)
3. Pour chaque réseau d'eau conçu à l'étape précédente, extraction de données, construction des courbes composites, et ciblage du minimum de la consommation d'énergie. Identification des réseaux d'eau prometteurs.
4. Conception du réseau d'échangeurs de chaleurs correspondant aux réseaux d'eau prometteurs en essayant de réduire le nombre d'échangeurs de chaleur par des mélanges d'eau à l'aide de la technique de modification des courbes composites.
5. Sélection d'un réseau d'eau et d'un réseau d'échangeurs de chaleur correspondant.

Les principes de la Méthode de Pincement Massique pour cibler la consommation d'eau, du diagramme-grille bidimensionnel pour concevoir des réseaux d'eau, et de la technique de modification des courbes composites pour concevoir des réseaux d'échangeurs sont présentés ci-après.

Principe de la Méthode du Pincement massique pour le ciblage de la consommation d'eau

Cette technique est utilisée pour évaluer la consommation minimale en eau dans un ensemble d'opérations qui requièrent de l'eau pour retirer des contaminants ; elle permet aussi d'identifier un point critique, appelé point de pincement, dans la conception du réseau d'eau [82]. Dans le pincement massique (Figure 2-13), l'extraction de données inclut le débit de contaminants à retirer (M en g/s) et la concentration maximale en contaminants dans l'eau à l'entrée et sortie de chaque opération (C en ppm). À partir de ces données, « la courbe composite limite » est construite ; celle-ci permet d'évaluer le débit théorique minimum d'eau propre et d'identifier le point de pincement massique. Lors de la conception du réseau d'eau, toute utilisation d'eau de lavage à une concentration inférieure à celle du pincement pour retirer des contaminants dans une opération qui accepte de l'eau à une concentration en contaminants supérieure à celle du

pincement devrait être évitée dans la mesure du possible car elle conduit à une consommation en eau propre supérieure au minimum théorique [83 et 84].

Principe du diagramme-grille bidimensionnel pour la conception de réseaux d'eau

Le diagramme-grille bidimensionnel [75] a été développé afin de considérer les implications énergétiques d'un réseau d'eau dans la phase de conception de celui-ci. La dimension verticale représente la température de l'eau ; celle horizontale, la concentration en contaminants à l'entrée et sortie de chaque opération. Les opérations sont d'abord représentées sur le diagramme-grille bidimensionnel selon leurs contraintes de concentration et température. Les opérations sont ensuite connectées avec des flèches qui représentent l'entrée et la sortie d'eau. Une flèche orientée vers le haut représente une demande de chaleur ; une flèche vers le bas représente une source de chaleur. L'eau fraîche correspond à des flèches entrant par la partie inférieure gauche du diagramme. Les flèches ressortent dans la partie inférieure droite, représentant l'eau envoyée vers la sortie avec une concentration élevée en contaminants et qui doit être refroidie. Le diagramme-grille bidimensionnel permet de visualiser les mélanges d'eau qui réduisent soit la consommation d'eau soit le nombre d'échangeurs de chaleur afin de faciliter la conception de réseaux d'eau avantageux.

Technique de modification des courbes composites pour la synthèse de réseaux d'échangeurs de chaleur correspondant à un réseau d'eau

Le nombre d'unités d'échangeur de chaleur peut être réduit soit en diminuant le nombre de courants soit en augmentant le nombre de systèmes séparés. Dans la technique proposée [85], les courbes composites initiales, qui résultent de l'extraction de données correspondant à un réseau d'eau spécifique, sont modifiées en utilisant les mélanges afin de réduire le nombre de courants ou bien augmenter le nombre de « systèmes séparés ». La relation d'Euler permet d'évaluer le nombre minimum théorique d'unités d'échangeur de chaleur N_{Umin} en fonction du nombre de courants chauds N_c et courants froids N_h , et du nombre de systèmes séparés N_s (équation 3).

$$N_{Umin} = N_c + N_h - N_s \quad \text{Équation 3}$$

Un système séparé est composé d'un ensemble de courants chauds et d'un ensemble de courants froids, ensembles dont la somme de l'énergie est identique ; ainsi ces ensembles peuvent théoriquement composer un système isolé. Le nombre d'unités d'échangeur de chaleur peut être réduit à la suite de mélanges qui diminuent le nombre de courants ou augmentent le nombre de systèmes séparés [57]. Les mélanges non isothermes de courants chauds ou froids impliquent des modifications de la courbe composite correspondante (Figures 2-14). La partie sous la courbe composite chaude (figure a) ou froide (figure c) représente l'ensemble des mélanges possibles. Si des courants chauds correspondant à des courants d'eau sont mélangés, le nombre de courants chauds est réduit. De même, si des courants froids correspondant à des courants d'eau sont mélangés, le nombre de courants froids est réduit. Tout mélange non-isotherme conduit à une perte d'exergie, qui correspond à la surface entre les courbes composites avant et après mélange si la température est remplacée par le facteur d'efficacité de Carnot en abscisse. La figure b représente la situation dans laquelle les sources d'eau chaude A et B sont mélangées ; la figure d, celle dans laquelle les demandes d'eau chaude A et B sont obtenues par mélange. Les mélanges de courants qui traversent le pincement sont dans la mesure du possible évités car ils conduisent à une augmentation de la consommation théorique minimale de chaleur. Les Figures 2-15 représentent un exemple de réduction du nombre d'échangeurs par une réduction du nombre de sources et demandes grâce à des mélanges. À l'origine, le système inclut deux sources et deux demandes d'eau chaude, qui requièrent donc trois échangeurs (figures a et b). Par mélange, le nombre de courants peut être réduit à deux (figure a), et dans ce cas le réseau requiert seulement un échangeur (figure c). Les Figures 2-16 représentent un exemple de réduction du nombre d'échangeurs par réduction du nombre de systèmes séparés grâce à des mélanges. À l'origine, deux sources et deux demandes forment un système, qui requiert donc trois échangeurs (figures a et b). Par mélange, le nombre de systèmes séparés peut être augmenté à deux (figure a), et dans ce cas le réseau requiert seulement un échangeur (figure c).

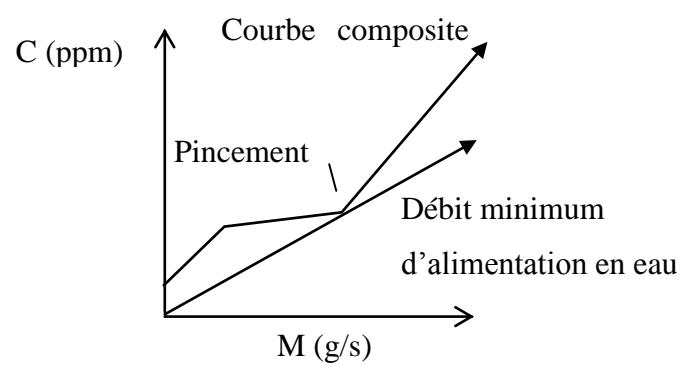
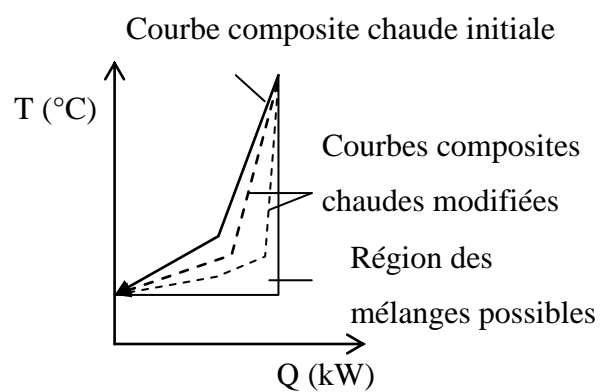
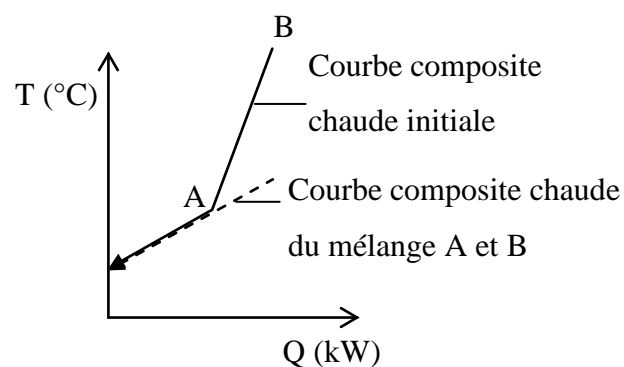


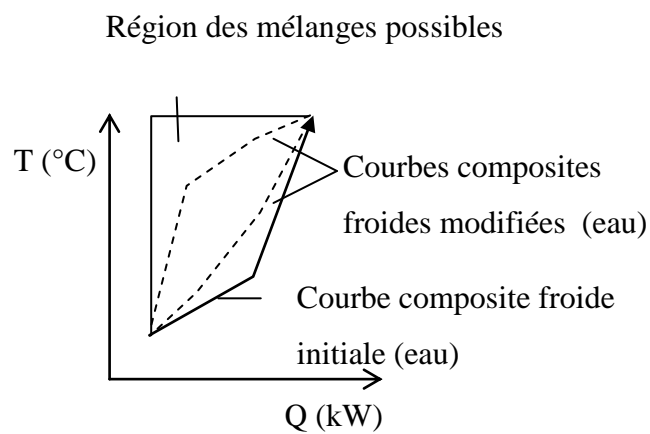
Figure 2-13 Principe de la Méthode du Pincement Massique



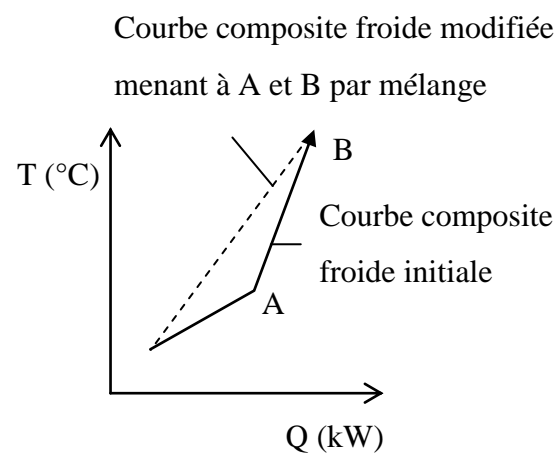
(a)



(b)

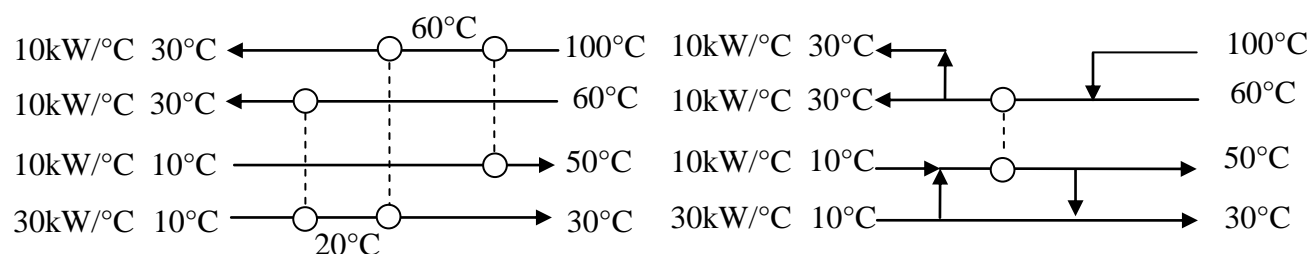
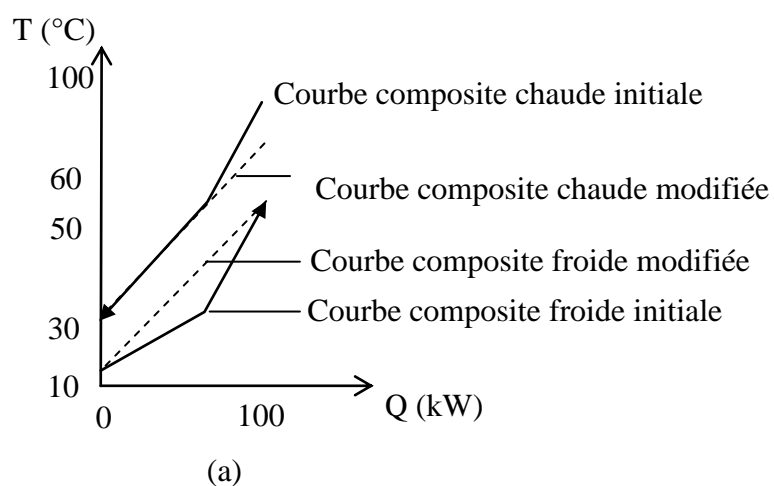


(c)

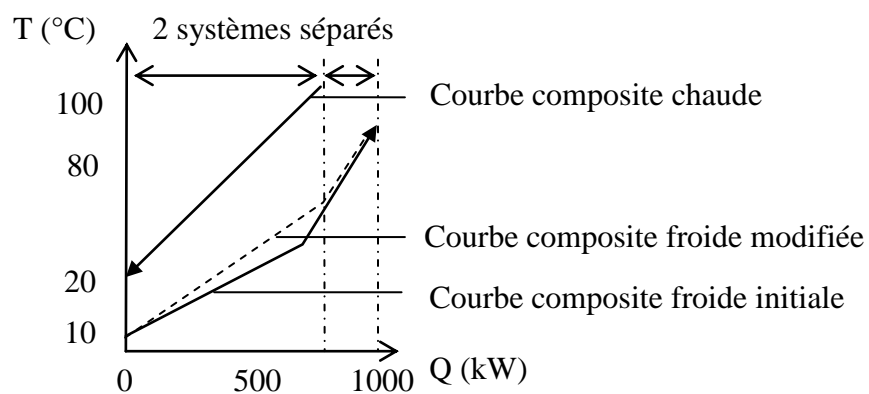


(d)

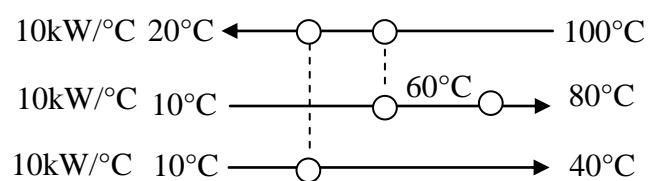
Figures 2-14 Possibilité de modifier les courbes composites par mélange



Figures 2-15 Modification des courbes composites afin de réduire le nombre de courants

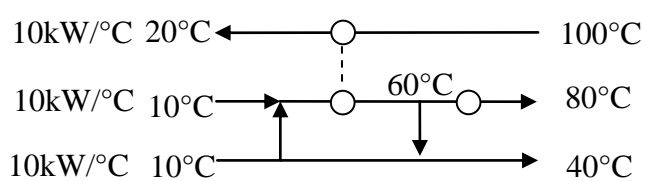


(a)



1 système séparé conduit à 3 échangeurs

(b)



2 systèmes séparés conduisent à 2 échangeurs

(c)

Figures 2-16 Modification des courbes composites pour augmenter le nombre de systèmes

2.2.6 Analyse critique

Les méthodologies de rétro-installation tentent d'adapter des outils d'intégration matière et énergie développés pour la synthèse de nouveaux réseaux.

La logique suivie pour la rétro-installation des réseaux d'eau ou des réseaux d'échangeurs de chaleur consiste à identifier des modifications qui rapprochent la situation actuelle d'un nouveau réseau conceptuel de référence.

Les approches sont séquentielles : un nouveau réseau d'eau est d'abord conçu, et ensuite un nouveau réseau d'échangeurs correspondant. L'analyse énergétique est ainsi effectuée pour un réseau d'eau spécifié. Cependant une modification dans le réseau d'eau correspond à une modification dans le réseau de chaleur. La nécessité d'une approche séquentielle provient de ce que les transferts directs de chaleur entre les courants chauds et les courants froids ne sont pas considérés par l'Analyse de Pincement.

La logique de comparaison des réseaux d'eau et énergie avec une référence, et l'approche séquentielle inélégante ne garantissent pas l'efficacité de l'intégration par rétro-installation.

2.3 Représentations visuelles des concepts utilisés pour l'intégration énergétique par rétro-installation

La visualisation d'un concept par une image ou un diagramme est un outil simple et puissant pour sa compréhension. « Com-prendre » implique imaginer et ensuite voir. L'Analyse de Pincement, approche la plus utilisée pour la rétro-installation des réseaux d'échangeurs de chaleur, est un bon exemple du besoin de visualiser un concept: son succès est dû en grande partie à l'utilisation de Courbes Composites.

2.3.1 Revue générale

Les Courbes Composites Chaudes, Froides et Globales sont fréquemment utilisées en situation de rétro-installation afin d'identifier un nouveau réseau conceptuel à consommation minimale en énergie. Des modifications dans le réseau actuel sont ensuite proposées afin de rapprocher celui-ci du réseau conceptuel. Les graphes de différence de température et des charges thermiques ont été développés afin d'identifier de telles modifications et d'analyser les implications de celles-ci sur l'ajout d'aire d'échange; ils sont présentés plus loin dans ce chapitre. L'Analyse de Pincement a été développée initialement pour la synthèse de nouveaux réseaux; un inconvénient dans cette approche réside en ce que les Courbes Composites n'incluent pas les informations relatives au réseau actuel, informations pourtant primordiales. Les Courbes Composites Avancées [87] ont été développées spécialement pour la rétro-installation et incluent certaines informations sur le réseau installé. L'approche constitue la version d'Analyse de Pincement la plus aboutie pour la rétro-installation des réseaux et est décrite ci-après dans ce chapitre.

Les réseaux d'échangeurs de chaleur sont souvent représentés avec le diagramme-grille. Une alternative au diagramme-grille est proposée par [88 et 89], le Diagramme Thermodynamique pour Rétro-installation (Retrofit Thermodynamic Diagram) dans l'optique de l'Analyse de Pincement. Dans ce diagramme, les courants et échangeurs actuels sont représentés selon leurs intervalles de température correspondants. Les échanges de chaleur traversant le point de pincement et des réarrangements dans le réseau sont identifiés visuellement.

Le diagramme d'exergie de Sankey montre les pertes d'exergie dans les différentes parties d'une usine [70, 71, 90]. L'épaisseur des flèches reflète le débit d'exergie. L'exergie à l'entrée et sortie d'une opération est représentée par des flèches; les pertes progressives de

l'exergie se reflètent par la diminution progressive de l'épaisseur des flèches. Ce diagramme montre que les pertes principales d'exergie dans une usine ont souvent lieu dans la chaudière, pertes dues à la combustion, au transfert de chaleur entre les gaz chauds résultant de la combustion et l'eau liquide pour la production de vapeur, et à l'évacuation des fumées. Un bon fonctionnement de la chaudière est important pour l'efficacité énergétique globale. Les pertes spécifiques d'exergie dans les différentes parties d'une usine actuelle peuvent être comparées avec celle d'une usine de référence afin d'identifier les opérations sujettes à l'amélioration.

La rétro-installation d'un réseau génère des économies d'énergie mais implique un coût d'investissement; celui-ci peut être décomposé en une partie variable liée à l'ajout d'aire d'échange et une partie dépendant des modifications topologiques. Plusieurs graphes ont été développés afin de comparer des solutions selon l'économie d'énergie, l'aire d'échange et les modifications topologiques. Dans une première version, l'axe horizontal représente la consommation d'énergie minimale des différentes topologies tandis que l'axe vertical, l'aire d'échange correspondant, une différence minimale de température d'échange étant fixée. Dans une seconde version, un troisième axe est utilisé afin de représenter le nombre d'enveloppes nécessaires [91]. Chaque nouvelle topologie y est représentée par sa consommation minimale ou la réduction de perte d'exergie correspondante, et l'aire d'échange et le nombre d'enveloppes associés. Dans une troisième version, chaque nouvelle topologie n'est plus représentée par un point correspondant à une consommation minimale et l'aire d'échange correspondante mais par une courbe : une topologie donnée conduit à une réduction de consommation d'énergie qui varie selon l'ajout d'aire d'échange. Ce graphe est largement utilisé et sera décrit dans ce chapitre.

Les méthodologies d'intégration énergétique par rétro-installation du réseau d'eau tentent dans leur majorité d'identifier des modifications qui le rapprochent d'un réseau d'eau de référence conceptuel. Celui-ci est classiquement identifié avec des méthodes de synthèse basées sur les concepts d'intégration massique. Les courbes composites représentant la concentration maximale en contaminants sur l'axe vertical et le débit d'eau ou de contaminants à retirer (ex. Figure 2-13) sur l'axe horizontal sont ainsi utilisées. Les outils incluent aussi le diagramme-grille bidimensionnel représentant la concentration maximale en contaminants et la température requise de l'eau à l'entrée et sortie des opérations, ainsi que la

courbe de réservoir et la technique de modification des courbes composites. Dans l'approche du C.E.W.O. proposée pour la rétro-installation, une courbe composite chaude spécifique est construite à partir des courants chauds disponibles pour la production d'eau chaude, et une courbe composite froide spécifique est construite à partir des demandes d'eau. Grâce à ces deux courbes, une nouvelle courbe de demande d'eau chaude ou une courbe de réservoir peut être identifiée à partir de la technique de modification des courbes composites. Cette courbe théorique est ensuite comparée avec la courbe représentant la situation réelle dans l'usine à partir des niveaux de température et débits d'eau mesurés. La comparaison permet d'identifier des modifications dans le réseau d'eau actuel le rapprochant d'un réseau de référence.

2.3.2 Courbes Composites Avancées

Les courbes composites chaudes, froides et globales traditionnelles sont basées uniquement sur les données des courants [92]. Elles n'incluent pas les données sur le réseau installé bien que cette information soit de grande importance pour la rétro-installation. La différence majeure entre les courbes traditionnelles et celles avancées réside en ce que des données sur le réseau sont incluses dans les secondes. Les courbes composites avancées fournissent les informations supplémentaires suivantes [87]:

- Estimation du potentiel d'économie d'énergie de projets économiquement réalisables avant le calcul détaillé de conception.
- Niveaux de température auxquels « la chaleur excédentaire utilisable », c'est-à-dire la chaleur en-dessous du point de pincement et au-dessus de 80°C, peut être extraite et utilisée, par exemple pour l'évaporation de la liqueur noire grâce au système « PIVap » développé dans cet objectif [93 et 94], un procédé de bioraffinage forestier [95 et 96], un parc industriel éco-cyclique, le chauffage ou refroidissement de logements à proximité de l'usine, ou valorisation dans une pompe à chaleur.

Au contraire de la courbe composite globale traditionnelle, les courbes composites avancées sont représentées selon la température réelle. Elles fournissent l'information sur la situation avant rétro-installation, le potentiel de réduction aisément accessible qui résulte d'une réduction de différence de température, la situation initiale des réchauffeurs et refroidisseurs, les températures théoriques hautes et basses de ceux-ci, ainsi que la chaleur excédentaire théorique et réelle [97 et 98].

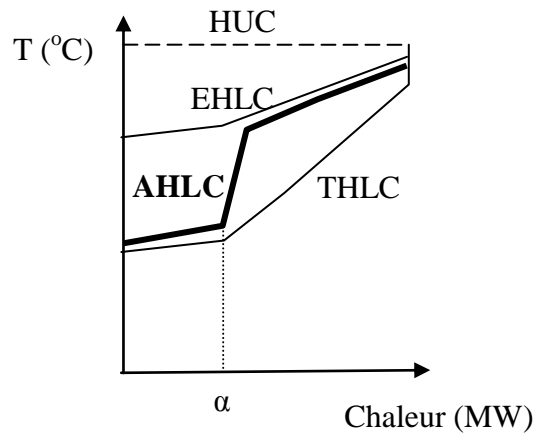
La méthode utilise quatre courbes composites au-dessus du pincement et quatre en dessous [99]. Seulement la construction des courbes au dessus du pincement est décrite ici; les courbes sous le pincement sont construites de la même façon. Les quatre courbes au-dessus du pincement sont la courbe d'utilité chaude (HUC), la courbe de demande de chaleur théorique (THLC), la courbe de demande de chaleur actuelle (AHLC), et la courbe de demande de chaleur extrême (EHLC). Les courbes en dessous du pincement sont la courbe d'utilité froide (CUC), la courbe de demande de refroidissement théorique (TCLC) la courbe de demande de refroidissement actuelle (ACLC), et la courbe de refroidissement extrême (ECLC). La courbe d'utilité chaude HUC est la courbe

composite des courants d'utilité dans les réchauffeurs existants située à température réelle. La courbe de demande de chaleur actuelle AHLC est la courbe composite correspondant aux courants de procédé chauffés dans les réchauffeurs existants. La courbe EHLC montre la température maximale à laquelle la chaleur des utilités peut être fournie avec la consommation actuelle si les échangeurs internes dans le réseau étaient agencés selon « l'arrangement vertical », c'est-à-dire de façon à minimiser la surface d'échange. Cette courbe correspond à la partie droite de la courbe composite froide ne chevauchant pas la courbe composite chaude. La courbe de demande de chaleur théorique est évaluée de la façon suivante. Les courbes composites chaudes et froides sont déplacées de sorte que la consommation minimale théorique en utilité égale celle actuelle; ceci conduit aux températures de pincement correspondant à la consommation actuelle et à la différence de température d'approche pour la récupération de chaleur (HRATD). Les parties des courbes au-dessus du pincement sont alors séparées de celles en dessous. Au-dessus du pincement, les sources de chaleur sont déplacées vers le bas selon le choix d'une différence de température minimale d'approche dans les échangeurs (EMATD), ex. 5°K; cette valeur doit être inférieure à celle du HRATD [100-104]. Ensuite la cascade de chaleur est évaluée au-dessus du pincement selon la valeur du EMATD afin d'identifier les températures minimales auxquelles les réchauffeurs peuvent être placés. La courbe THLC montre ainsi les températures minimales théoriques des courants froids dans les réchauffeurs si la différence minimale de température dans les échangeurs internes est réduite à la valeur de l'EMATD. Symétriquement, la courbe TCLC montre les températures maximales théoriques des courants chauds dans les refroidisseurs si la différence minimale de température dans les échangeurs internes est réduite à la valeur de l'EMATD. Par conséquent une partie de la demande de refroidissement dans la courbe TCLC peut être couplée avec une partie de la demande de chaleur dans la courbe THLC. Cette quantité de chaleur correspond au potentiel d'économie d'énergie résultant de la réduction de la différence de température entre les courbes composites chaudes et froides du HRATD à l'EMATD.

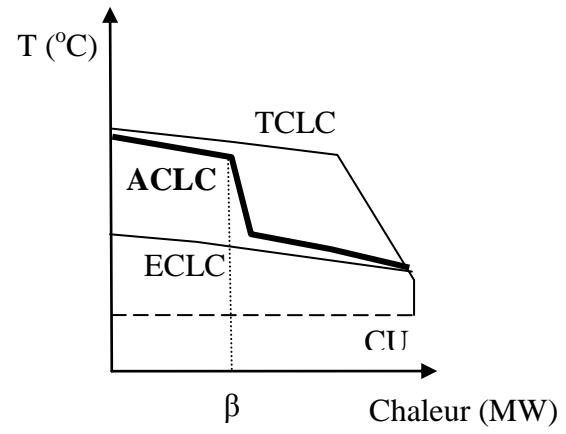
En résumé les courbes montrent les charges et niveaux de température des utilités de chauffage (HUC) et refroidissement (CUC), les courants de procédé dans les réchauffeurs actuels (AHLC) et refroidisseurs actuels (ACLC), les niveaux de température minimale et maximale des courants de procédé dans les réchauffeurs (THLC et EHLC respectivement), et les niveaux de température minimale et maximale des courants de procédé dans les refroidisseurs (ECLC et TCLC respectivement).

Utilisation des courbes avancées pour identifier les opportunités de retro-installation [105] :

1. Réduire la charge thermique des réchauffeurs placés bas en température et des refroidisseurs placés haut en température est habituellement plus aisé et moins onéreux que modifier les autres réchauffeurs et refroidisseurs parce que la première situation implique moins de modifications et moins d'aire d'échange. Par conséquent le nombre de modifications et l'ajout d'aire d'échange sont souvent plus petits lorsque la courbe AHLC est proche de la courbe THLC et éloignée de la courbe EHLC. La Figure 2-17a montre ainsi que l'économie de α MW est probablement aisée car les réchauffeurs correspondants sont proches du minimum théorique et sont donc plus facilement accessibles. Symétriquement le nombre de modifications et l'ajout d'aire d'échange sont souvent plus petits lorsque la courbe AHLC est proche de la courbe TCLC et éloignée de la courbe ECLC. La Figure 2-17b montre ainsi que l'économie de β MW est probablement aisée car les refroidisseurs correspondants sont proches du maximum théorique et sont donc plus facilement accessibles.
2. Les courbes avancées montrent l'excès de chaleur directement utilisable et potentiellement disponible après modification du réseau selon leurs niveaux réels de la température. La chaleur en excès directement utilisable est représentée par la courbe ACLC; la chaleur en excès disponible après modification est représentée par la courbe TCLC (Figure 2-17b).



(a)



(b)

Figures 2-17 Courbes composites avancées au-dessus (a) et en dessous (b) du pincement

2.3.3 Graphe des charges thermiques

Cet outil a été développé pour identifier des modifications dans un réseau d'échangeurs, dans une optique de l'Analyse de Pincement. L'axe vertical représente la température, celui horizontal, le débit de capacité calorifique ($\text{kW}/^{\circ}\text{C}$). Dans un échange de chaleur, le courant chaud cède sa chaleur au courant froid; les charges thermiques (kW) des courants chaud et froid sont représentées dans ce graphe par des aires, correspondant aux températures à l'entrée et la sortie et aux débits de capacité calorifique. Dû au bilan d'énergie, les aires des courants chaud et froid sont identiques dans un transfert de chaleur. Si le débit de capacité calorifique ne varie pas selon la température, la charge thermique a la forme d'un rectangle. Deux organisations sont proposées : les courants sont représentés comme des entités (séparées) et les échangeurs correspondent à des divisions de ces entités; les échangeurs sont représentés comme des entités. Un exemple d'un réseau incluant deux échangeurs est présenté à la Figure 2-18 selon la seconde organisation.

Tout réseau peut être représenté dans le graphe. Un changement topologique correspond à un déplacement de rectangles; il s'agit d'associer des rectangles afin de réduire la consommation d'énergie et limiter les coûts d'investissement. Coupler des rectangles avec des aires similaires et des niveaux de température relativement proches est à priori avantageux : le nombre d'échangeurs de chaleur est ainsi réduit. Cependant le nombre d'enveloppes (shells) nécessaires dans un échangeur augmente rapidement avec la température de chevauchement (overlap) dans celui-ci. Dans la Figure 2-18, l'échangeur A nécessite moins d'enveloppes que l'échangeur B, alors que les charges thermiques sont semblables; ceci est dû au fait que la température de chevauchement ΔT_A dans l'échangeur A, est beaucoup plus petite que celle dans l'échangeur B, ΔT_B . Le graphe permet d'identifier des modifications supprimant des échanges traversant le point de pincement, le nombre d'échangeurs et le nombre d'enveloppes correspondant à une solution.

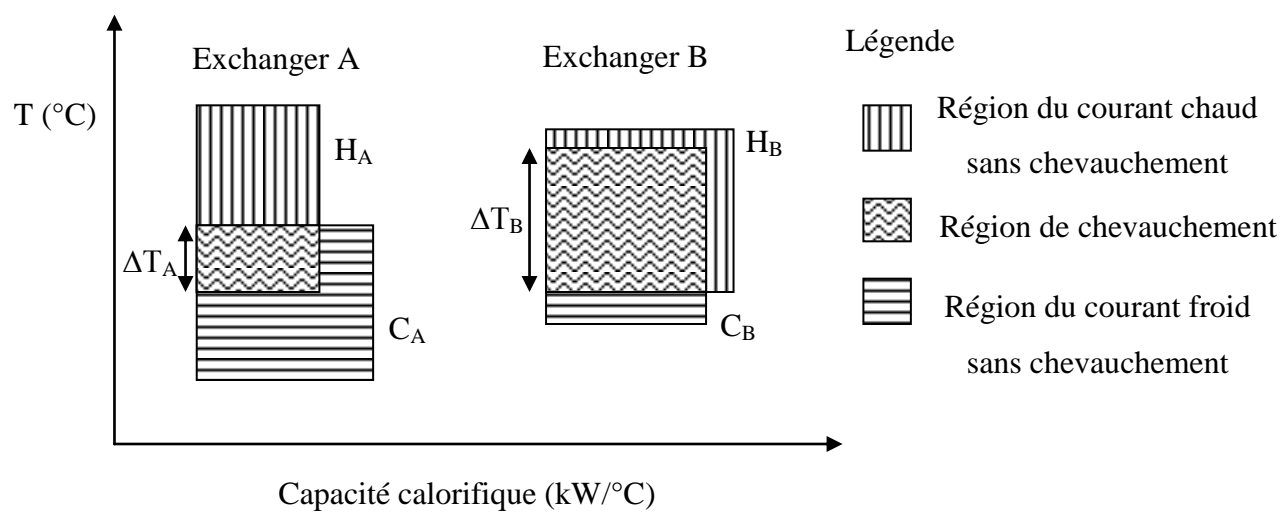


Figure 2-18 Graphe de charge thermique

2.3.4 Graphe de différence de température

L'utilisation sous-optimale de la différence de température disponible dans les échangeurs actuels conduit parfois à une augmentation de la consommation d'énergie par rapport au minimum évalué avec l'Analyse de Pincement. Dans le graphe de différence de température (Driving Force Plot), l'axe vertical représente la différence de température et l'axe horizontal, la température du courant froid [106]. Il permet de comparer les différences de températures ΔT dans les échangeurs actuels avec la différence maximale de température disponible; celle-ci résulte de l'arrangement « vertical » des échangeurs sur les Courbes Composites placées selon une différence minimale de température fixée. Le profil de tous les échangeurs actuels dans un réseau et celui théorique sont présentés dans un même graphe. Dans la plupart des situations, la majorité des échangeurs utilise une différence de température plus grande que celle résultant de l'arrangement vertical.

La Figure 2-19 présente une situation où le courant froid de l'échangeur C devrait être chauffé par un courant chaud à plus basse température. Bien que sa différence de température ne soit pas beaucoup plus grande que celle maximale disponible (courbe en traits discontinus), elle traverse une région où les contraintes sont importantes, et où tout dépassement a des effets importants sur l'ensemble du réseau. Ce graphe est utile pour poser un diagnostic sur les inefficacités thermiques et identifier des lignes de conduites générales pour la rétro-installation dans l'optique de l'Analyse de Pincement.

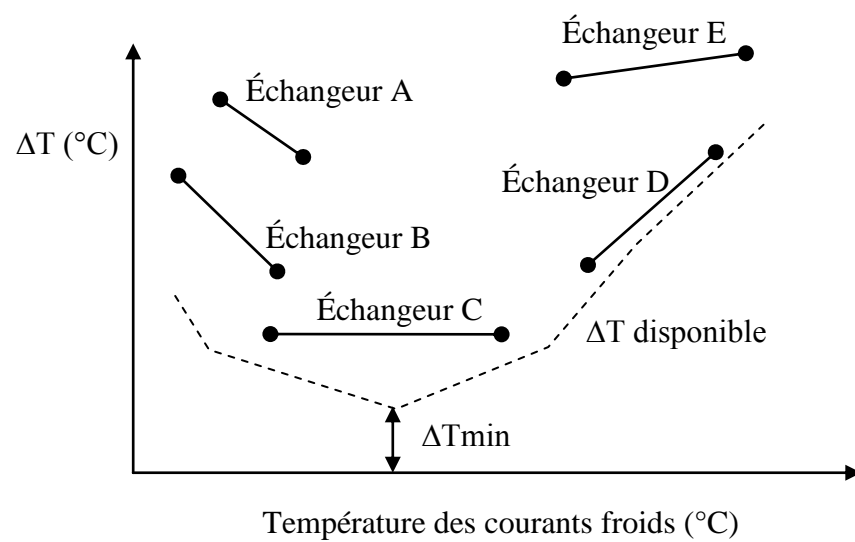


Figure 2-19 Graphe de différence de température

2.3.5 Graphe de l'aire d'échange en fonction de la consommation d'énergie

La réduction de la consommation d'énergie varie selon l'ajout d'aire d'échange et les modifications topologiques dans le réseau. Le graphe de l'aire d'échange en fonction de la consommation d'énergie [107] de la Figure 2-20 montre la situation du réseau initial, celle du nouveau réseau hypothétique à consommation minimale (M.E.R.) obtenu avec l'Analyse de Pincement, et deux types de courbe : une courbe en trait discontinu correspond à un ensemble de solutions avec aire d'échange minimale pour un même nombre de modifications topologiques, $n^{\Delta_{top}}$; une courbe en trait continu correspond à un ensemble de solutions dont la topologie est identique.

Pour une topologie identique, l'ajout d'aire d'échange (pente) augmente avec la réduction de la consommation d'énergie. Les numéros sur les courbes à topologie identique désignent l'ajout d'enveloppes (shell); le nombre d'enveloppes augmente avec la réduction de la consommation d'énergie. La solution maximisant le profit pour une topologie fixée n'est pas nécessairement celle à consommation minimale, mais souvent une solution « relaxée » sur une courbe [108].

Les courbes en trait discontinu résultent de l'enveloppe des courbes des meilleures solutions pour un même nombre de modifications topologiques, selon la logique proposée par Asante et Zhu [30]. L'aire d'échange augmente de façon asymptotique avec la réduction de consommation d'énergie; ceci est dû à la réduction progressive de la différence de température dans un échangeur du réseau sur un chemin réchauffeur-refroidisseur (heater-cooler path), jusqu'à devenir nulle.

Ce graphe est largement utilisé; il permet de visualiser l'ensemble des solutions correspondant à différentes topologies et les deux principaux termes inclus dans une fonction de profit : le revenu est représenté par la réduction de la consommation d'énergie; le coût est représenté par l'aire d'échange, le nombre de modifications topologiques et le nombre d'enveloppes dans les échangeurs.

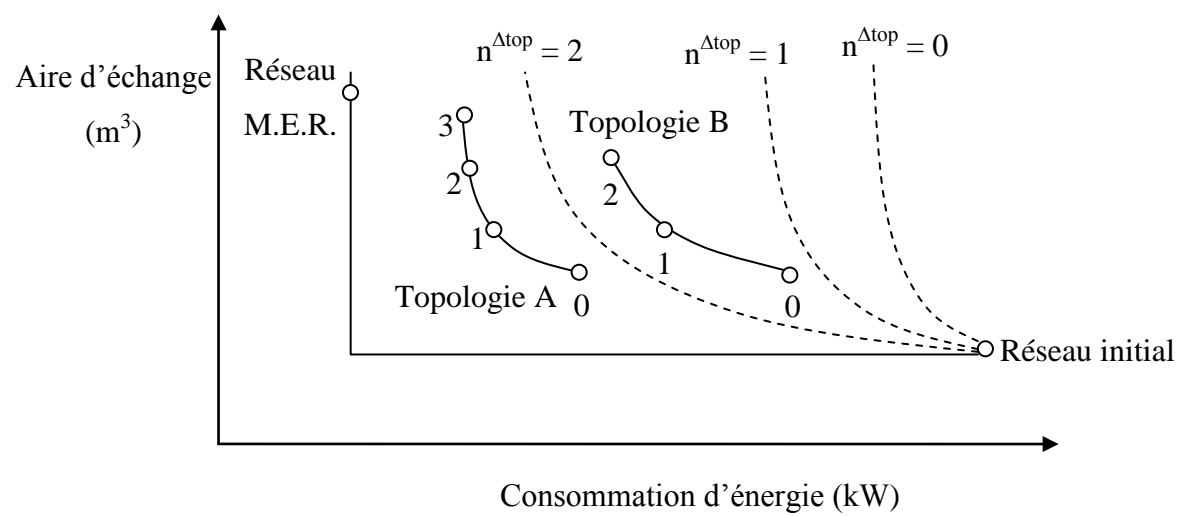


Figure 2-20 Graphe d'aire d'échange en fonction de la consommation d'énergie

2.3.6 Analyse critique

Les représentations visuelles sont utilisées dans le cadre de l'Analyse de Pincement. Cette dernière est utilisée pour identifier une référence, qui est un nouveau réseau conceptuel. La logique suivie pour la rétro-installation consiste à identifier ensuite des modifications qui rapprochent le réseau existant d'une référence.

Des informations sur les échanges actuels sont représentées afin d'identifier visuellement des modifications qui rapprochent le réseau existant d'une référence et qui présentent des avantages.

Les courbes composites avancées incluent des informations sur les réchauffeurs et refroidisseurs. Elles permettent d'estimer la quantité de chaleur qui peut éconômisée plus facilement en théorie, et donc un ciblage plus réaliste. Elles n'incluent pas d'information sur les échangeurs internes, ni sur les contraintes de connexion.

2.4 Lacunes dans l'ensemble des connaissances

Le processus fondamental permettant de réduire la consommation d'énergie dans un procédé par rétro-installation n'est pas explicite.

Les méthodologies d'intégration énergétiques par rétro-installation basées sur l'analyse se limitent souvent à comparer la situation réelle avec une situation de référence; elles consistent à évaluer un potentiel théorique d'économie et ensuite identifier des modifications qui rapprochent le réseau actuel d'un réseau « bien conçu » selon la thermodynamique.

Pour définir un problème de rétro-installation du système énergétique, il est nécessaire de spécifier (1) les sources et demandes en chaleur du procédé, (2) la façon dont celles-ci sont gérées dans le réseau actuel d'échanges de chaleur, et (3) les contraintes spécifiques à chaque connexion. L'utilisation de la méthode du pincement est la plus répandue mais rencontre des difficultés pour la rétro-installation des réseaux existants en interaction étroite avec le circuit d'eau. Seulement les sources et demandes (1) sont spécifiées dans cette approche. Ceci explique en grande partie les difficultés rencontrées lors de son utilisation dans les situations de rétro-installation et impliquant des transferts direct de chaleur. Un ensemble d'outils méthodologiques est actuellement nécessaire pour l'analyse énergétique par rétro-installation des systèmes incluant des transferts directs de chaleur. Pour réduire la consommation de chaleur, le réseau d'eau est d'abord modifié; ensuite les données correspondant au réseau modifié sont extraites et le ciblage est effectué; finalement des modifications dans le réseau d'échangeurs de chaleur à contact indirect sont proposées en comparant avec une situation de référence. L'approche séquentielle, d'abord modifier le réseau d'eau et ensuite le réseau d'échangeurs de chaleur à contact indirect, résulte de l'impossibilité de définir les contraintes spécifiques à chaque connexion dans la méthode de pincement.

Les approches numériques d'optimisation pour la rétro-installation sont complexes, nécessitent un temps de calcul élevé et ne garantissent pas l'optimalité. Leurs formulations actuelles incluent un modèle de coût d'opération et d'investissement, un bilan d'énergie et des contraintes de conception. Les difficultés rencontrées suggèrent que des améliorations significatives sont possibles en incluant plus de connaissances thermodynamiques dans la formulation.

Ces lacunes résultent ultimement de ce que le processus fondamental de réduction de consommation d'énergie par rétro-installation n'a pas été explicité. Des développements méthodologiques dans le domaine de l'intégration énergétique sont nécessaires.

L'énergie est conservée et dégradée dans un procédé; elle est soit convertie en électricité, soit stockée sous forme chimique, soit rejetée à l'environnement où sa dégradation est maximale. Réduire par rétro-installation la consommation d'énergie dans un système implique de réduire le débit de chaleur dégradée des utilités chaudes jusqu'à l'environnement. Cependant aucune méthode d'intégration énergétique n'analyse la dégradation progressive de l'énergie à partir des utilités chaudes jusqu'à l'environnement au travers des opérations et échanges de chaleur existants.

2.5 Hypothèses

La Figure 2-21 résume différents aspects critiques liés à la problématique de l'analyse énergétique d'une usine papetière et d'une bioraffinerie forestière.

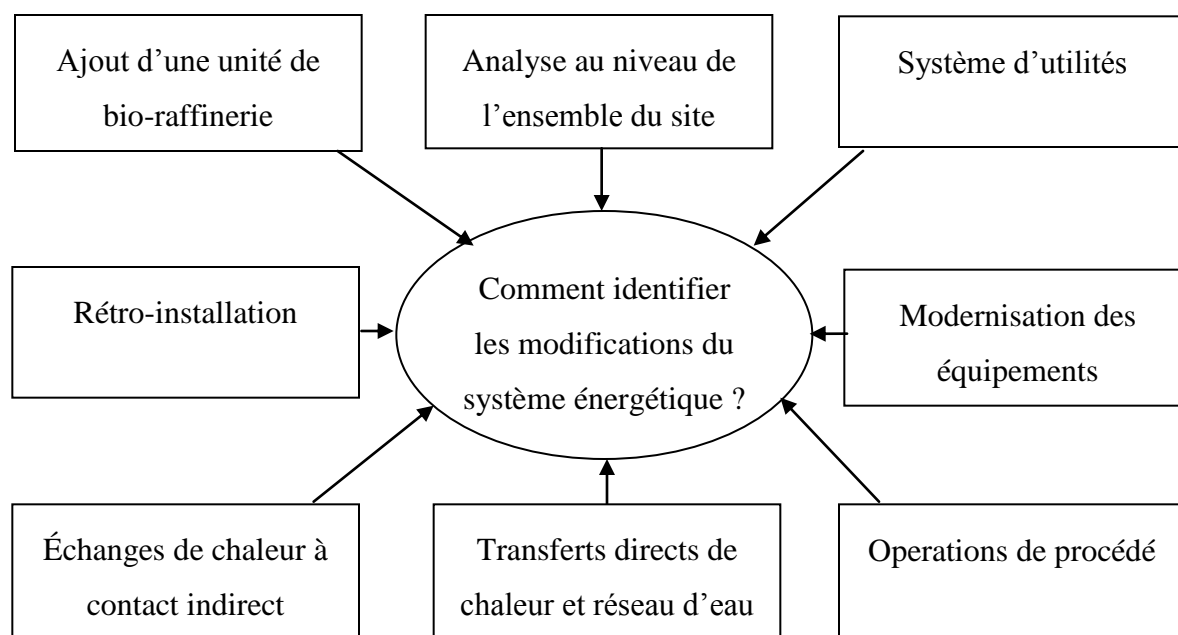


Figure 2-21 Problématique de l'analyse énergétique des usines de pâte et papiers et bioraffineries

L'hypothèse de recherche principale découlant de cette problématique se résume ainsi :

L'analyse des modifications qui réduisent le débit de chaleur dégradée entre les utilités chaudes et l'environnement à travers le réseau actuel d'échangeurs de chaleur à contact indirect, les transferts directs de chaleur et les opérations de procédé peut servir de base au développement d'une méthodologie systématique et pratique d'intégration énergétique des usines, incluant les bio-raffineries – méthodologie basée sur les deux premiers principes de la thermodynamique de conservation et dégradation de l'énergie.

Les hypothèses secondaires rattachées à cette hypothèse principale sont les suivantes :

1. L'analyse de la dégradation progressive de la chaleur entre les utilités chaudes et l'environnement à travers les échangeurs de chaleur **à contact indirect** dans les procédés industriels peut servir de support au développement d'une méthode systématique d'intégration énergétique par rétro-installation des réseaux, et qui peut être validée par des études de cas.
2. La méthodologie développée pour l'analyse énergétique des réseaux d'échangeurs de chaleur à contact indirect peut être étendue **aux transferts directs** de chaleur et les opérations du procédé, et être validée avec des études de cas.
3. La représentation sur un diagramme des dégradations successives de l'énergie à partir des utilités chaudes jusqu'à l'environnement à travers les échanges de chaleur existants et les opérations permet d'identifier les modifications nécessaires dans (a) le système d'utilités, (b) le réseau d'échangeurs de chaleur et (3) les opérations de procédé, et est un outil efficace pour l'intégration énergétique des usines, incluant les procédés de bioraffinage.

CHAPITRE 3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

La recherche en conception de procédés a pour objectif de développer des outils ou méthodes d'aide à la prise de décision pour des applications industrielles. La validation de ces outils sur des études de cas est essentielle. La Figure 3-1 présente l'approche méthodologique globale et les liens avec les hypothèses.

Les étapes suivies dans cette thèse ont été les suivantes :

1. Analyse des méthodologies utilisées pour la réduction de la consommation d'eau et énergie
2. Analyse du procédé de pâte kraft.
3. Recueil de données dans une usine de pâte kraft au Canada
4. Construction d'un modèle du procédé de pâte kraft avec le logiciel Cadsim Plus Papdyn
5. Utilisation des outils d'analyse énergétique existants pour l'usine, tels que l'identification des opportunités à partir de l'analyse et du bon sens, l'analyse de pincement thermique et les approches associées, l'analyse du circuit d'eau, et l'optimisation
6. Développement d'une méthode pour la rétro-installation des réseaux d'échanges à contact indirect
7. Application et validation de la méthode développée avec des études de cas impliquant des échanges à contact indirect, dont le procédé de pâte kraft
8. Extension de la méthode développée pour les échanges à contact indirect aux transferts directs de chaleur
9. Application et validation des outils développés avec des études de cas impliquant des échanges à contact indirect et des transferts directs, dont le procédé de pâte kraft
10. Développement d'un diagramme représentant la conservation et la dégradation de l'énergie des utilités chaudes jusqu'à l'environnement et traversant les opérations ainsi que les échangeurs
11. Extension de la méthode d'analyse aux opérations de procédé et au niveau du site industriel
12. Application et validation de la méthodologie d'analyse énergétique avec des études de cas, incluant l'intégration d'une bioraffinerie dans une usine de pâte kraft

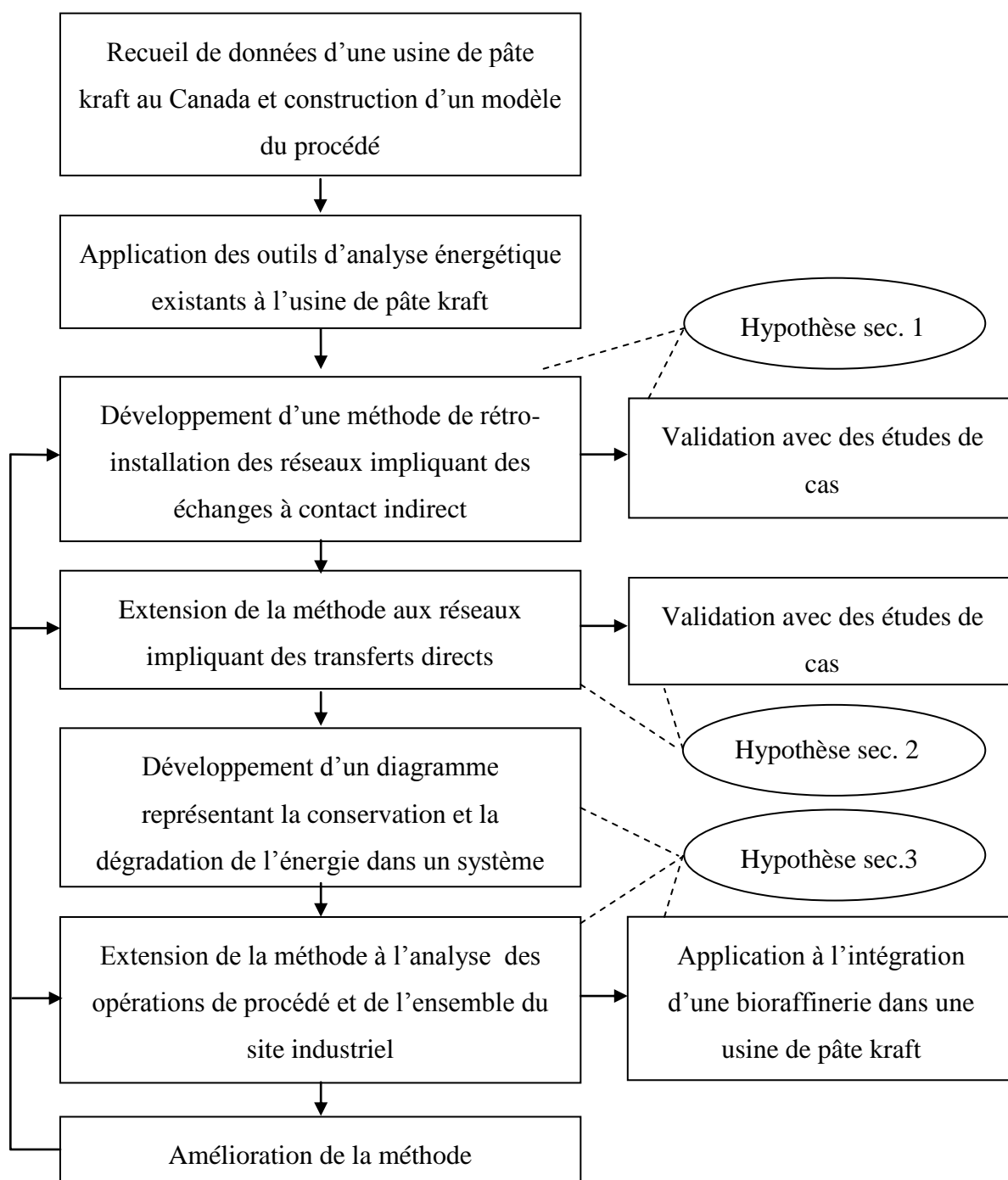


Figure 3-1 Méthodologie générale du projet

CHAPITRE 4 SYNTHÈSE

4.1 Présentation des articles

Le développement de la méthode pontale a été précédé par une revue des méthodologies existantes pour la rétro-installation du système énergétique des usines papetières, l'analyse et la modélisation d'une usine de pâte kraft au Canada. Les résultats ont été condensés dans un chapitre de livre, une présentation à la Semaine du Papier organisée par PAPTAC, et un article. La méthode pontale est présentée dans des articles soumis dans des journaux scientifiques. Les publications décrivant la méthode pontale sont incluses en annexe. Les références du chapitre du livre, la présentation à la Semaine du Papier 2010 organisée par PAPTAC, l'article sur l'optimisation du lavage de la pâte écrue et les articles sur la méthode pontale sont les suivantes :

1. J.-C. Bonhivers, et P. R. Stuart, " Applications of Process Integration methodologies in the pulp and paper industry “, chapitre du livre “Handbook of Process Integration (PI): Minimisation of energy and water use, waste and emissions,” édité par J. Klemes, Université de Pannonia, Hongrie, Woodhead Publishing Series in Energy No. 61
2. Chew, I., Foo, D. C. Y., Bonhivers, J. C.; Stuart, P.R., Alva-Argaez, A., Savulescu, L., “A model-based approach for simultaneous water and energy reduction in a pulp and paper mill”, *Applied Thermal Engineering*, v 51, n 1, p 393-400, 2012
3. J.-C. Bonhivers, S. Bala et P. R. Stuart, " Bridge Analysis to Reduce the Industrial Energy Requirements by Heat-Exchanger Network Retrofit: Part 1 - Concepts", soumis à *Energy*.
4. J.-C. Bonhivers, S. Bala, et P. R. Stuart, " Bridge Analysis to Reduce the Industrial Energy Requirements by Heat-Exchanger Network Retrofit: Part 2 - Applications", soumis à *Energy*.
5. J.-C. Bonhivers et P. R. Stuart, " Bridge Analysis to Reduce the Heat Consumption by Retrofit of Networks Composed of Indirect-Contact Heat Exchanges and Direct Heat Transfers”, soumis à *Applied Thermal Engineering*.
6. J.-C. Bonhivers, M. Korbel, M. Sorin et P. R. Stuart, " Energy Transfer Diagram for Improving Heat Integration of Industrial Systems”, soumis à *Applied Thermal Engineering*.

La Figure 4.1 présente une brève description de ces articles ainsi que les liens entre eux.

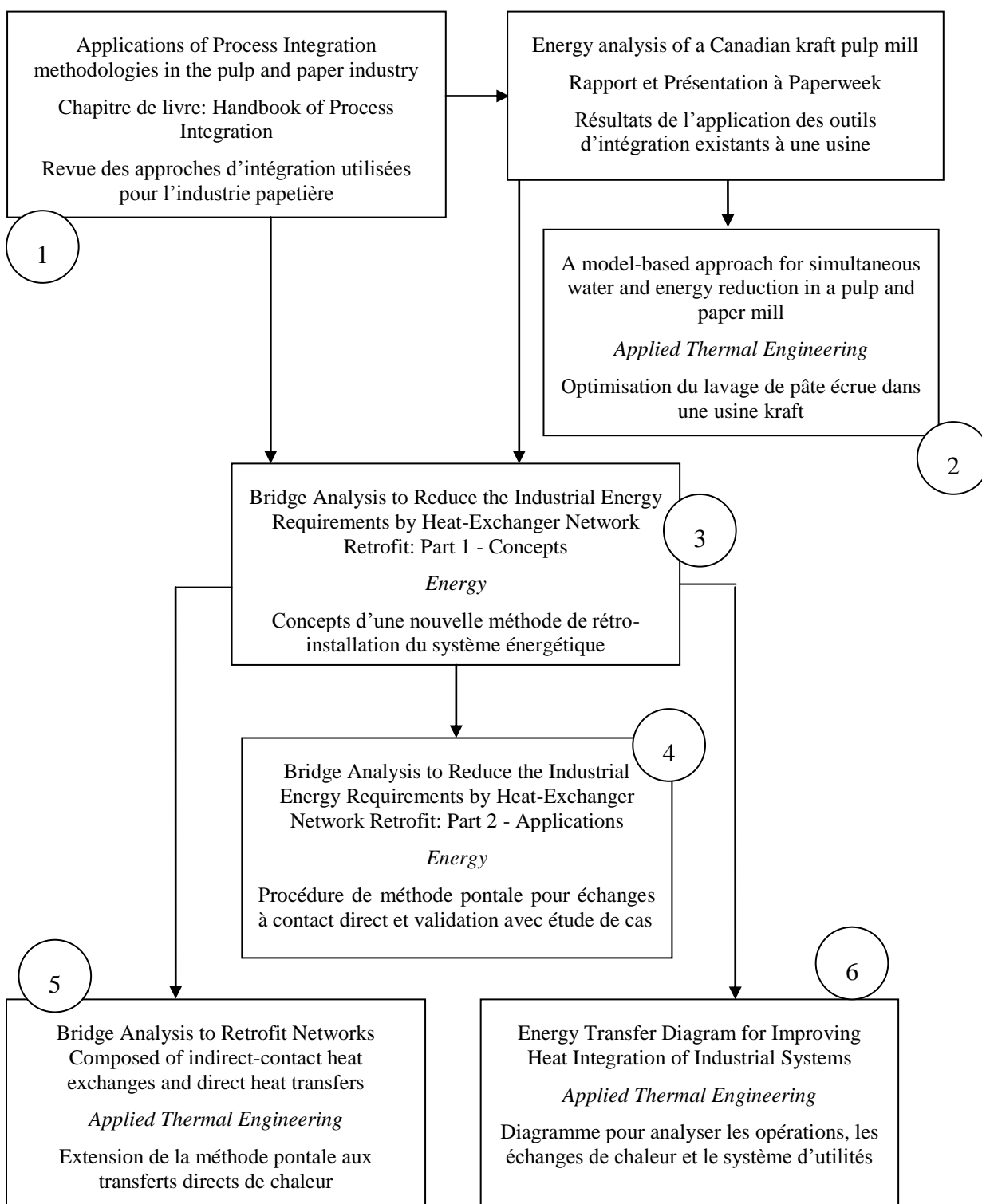


Figure 4-1 Organisation des articles

Organisation et description des articles

Dans la figure 4.1, le numéro 1 réfère à chapitre de livre dans lequel est présentée une revue des méthodologies d'intégration utilisées dans l'industrie des pâtes et papiers, qui est caractérisée par la situation de rétro-installation et l'importance des transferts directs de chaleur. Comme les interactions entre les réseaux d'eau et de chaleur sont étroites dans les usines, la plupart des approches considèrent le circuit d'eau dans l'analyse.

Les résultats d'analyse d'une usine de pâte kraft obtenus avec des outils d'intégration énergétique existants sont compilés dans un rapport ont été présentés à la Semaine du Papier organisée par PAPTAC en 2010. Les deux procédés de pâte kraft et les deux machines à papier de l'usine ont été modélisé avec le logiciel Cadsim Plus Papdyn. L'analyse inclut notamment la logique de contrôle du circuit d'eau, la dynamique du procédé, l'analyse de pincement, et l'optimisation du circuit du lavage dans la section du blanchiment avec le logiciel Matlab. De plus, une formulation NLP pour l'optimisation du système de production d'eau tiède et d'eau chaude de l'usine a été développée et utilisée sous le logiciel Matlab afin d'identifier les meilleures choix de contrôle lors de perturbations telles que l'encrassement d'un ou plusieurs échangeurs et la température de l'eau fraîche, qui varie selon la saison et a un impact important sur la consommation d'énergie de l'usine. La fonction de l'objectif à minimiser exprime le coût d'énergie lié au système de production d'eau. Les variables de décision sont le débit d'eau au travers les échangeurs et à l'entrée et sortie des réservoirs. Les principales contraintes représentent les bilans de matière et d'énergie, la relation entre la vitesse de l'eau dans les échangeurs et son coefficient de transfert de chaleur, les demandes du procédé, et les bornes minimales et maximales des débits passant dans les échangeurs. L'approche s'est révélée efficace. Cette piste devrait être poursuivie et appliquée. Les résultats ont été présentés à la Semaine du Papier 2010 organisée par Paptac.

Le numéro 2 réfère à un article dont le premier auteur est Irène Chew. L'analyse de l'usine avait montré qu'une réduction importante de la consommation d'énergie pouvait être obtenue par des modifications simples dans le système de lavage de la pâte écrue. Le circuit des eaux de lavage ne pouvait pas être organisé de façon classique à contre-courant, comme il est conseillé, du fait des contraintes du système et de l'historique de l'usine. Par conséquent, le circuit d'eau était le reflet des décisions prises par les ingénieurs, et le débit de liqueur noire envoyée au système d'évaporation était plus élevé d'environ 15% par rapport à la normale. Ceci avait pour résultat

une augmentation de la consommation de vapeur dans la section d'évaporation de la liqueur noire, une augmentation de la consommation d'eau chaude et une diminution de température dans un réacteur de blanchiment. Une formulation MINLP basée sur une superstructure a alors été développée afin de réduire la consommation d'énergie. La fonction de l'objectif représente le coût, qui inclut la consommation d'énergie et l'investissement. Les variables de décision représentent les modifications dans le circuit d'eau de lavage. Les principales contraintes proviennent des bilans de matière et d'énergie, des équations d'efficacité des laveurs, des demandes du procédé et des relations de coût. Le problème a été résolu sous le logiciel LINGO. L'analyse a montré que la consommation d'énergie pouvait être réduite de façon significative grâce à quelques changements simples dans le circuit. Cette approche utilisant l'optimisation s'est révélé simple et efficace.

Le numéro 3 réfère à un article qui décrit les concepts à la base d'une nouvelle méthode de rétro-installation des échangeurs à contact indirect. Le mécanisme fondamental de réduction de la consommation d'énergie est explicité. Le pont, l'évaluation de celui-ci, une méthode pour l'identification systématique des ponts, et la table de réseau sont présentés.

Le numéro 4 correspond à un article présentant la procédure de la méthode pontale pour la rétro-installation des échangeurs à contact indirect et des applications, incluant le réseau d'une usine de pâte kraft. Les ponts sont énumérés et caractérisés. La topologie du réseau correspondant à des modifications pontales est présentée.

Le numéro 5 réfère à un article qui étend l'application de la méthode aux réseaux incluant aussi des transferts directs de chaleur. Ceux-ci sont particulièrement importants dans l'industrie papetière. La façon d'extraire les données est expliquée en détail. Celle-ci est rendue explicite par la méthode développée, qui est basée sagement sur le mécanisme fondamental de réduction d'énergie. Les applications sont ensuite présentées, incluant le système de production d'eau chaude de l'usine de pâte kraft qui avait été modélisée au début de la thèse.

Finalement le numéro 6 réfère à un article présentant le diagramme de transfert d'énergie qui permet d'identifier tous les ponts d'une usine, incluant des échangeurs à contact indirect, des transferts directs de chaleur ou des opérations de procédé. La construction et la façon d'interpréter le diagramme sont décrites en détail. Chaque courbe représente le débit d'énergie

dégradé en fonction de la température. Le diagramme est ensuite utilisé pour l'intégration énergétique d'un procédé de production de furfural, seul ou associé à un procédé de pâte kraft.

Les liens entre les hypothèses de recherche et les articles sont résumés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Liens entre les hypothèses et les articles

Hypothèse secondaire	Article(s) relié(s)
1) Méthode pour échanges à contact indirect basée sur dégradation de chaleur	<ul style="list-style-type: none"> • Bridge Analysis to Reduce the Industrial Energy Requirements by Heat-Exchanger Network Retrofit: Part 1 - Concepts • Bridge Analysis to Reduce the Industrial Energy Requirements by Heat-Exchanger Network Retrofit: Part 2 - Applications
2) Extension de la méthode pour transferts directs	<ul style="list-style-type: none"> • Bridge Analysis to Reduce the Heat Consumption by Retrofit of Networks Composed of Indirect-Contact Heat Exchanges and Direct Heat Transfers
3) Identification des modifications avec diagramme dégradation	<ul style="list-style-type: none"> • Energy Transfer Diagram for Improving Heat Integration of Industrial Systems

La sous-section ci-après présente les concepts, une analyse de différents aspects et un résumé de la méthode pontale développée dans le cadre de cette thèse.

4.2 Concepts de la méthode pontale

Ce résumé débute avec la nomenclature utilisée et se poursuit avec l'extraction de données, la définition du pont de chaleur, la procédure d'identification des ponts, leur évaluation, la table de réseau, les transferts directs de chaleur, le diagramme de transfert d'énergie et la procédure globale pour la rétro-installation des réseaux d'échangeurs.

4.2.1 Nomenclature et conventions

La chaleur est transférée d'une source, qui peut être un courant de procédé ou d'une utilité de chauffage, à un puits, qui peut être un courant de procédé ou d'une utilité de refroidissement. Dans un réseau d'échangeurs de chaleur existant, un fournisseur est la partie de la source refroidie dans un échangeur, un récepteur la partie du puits réchauffée dans un échangeur. Un échangeur est désigné réchauffeur H si le fournisseur est une utilité de chauffage, un échangeur interne E si la chaleur est échangée entre une source de procédé et une demande de procédé, un refroidisseur C si la chaleur est évacuée du réseau. Un couple (match) composé du fournisseur a_m^s de l'échangeur A_m et du récepteur b_n^r de l'échangeur B_n est représenté par la convention $a_m^s b_n^r$. Les conventions pour représenter les couples fournisseur-récepteur sont résumées à la Tableau 4.2. Le réseau d'échangeurs de chaleur qui sera utilisé pour les explications des concepts est présenté à la Figure 4-2.

Tableau 4.2 Représentation des couples fournisseur-récepteur

Équipement	Refroidisseur, C_x	Échangeur interne, E_y	Réchauffeur, H_z
Couple	$c_x^s c_x^r$	$e_y^s e_y^r$	$h_z^s h_z^r$
Source	Source de procédé		Utilité de chauffage
Fournisseur	c_x^s	e_y^s	h_z^s
Transfert	↓	↓	↓
Récepteur	c_x^r	e_y^r	h_z^r
Puits	Environnement	Demande de procédé	

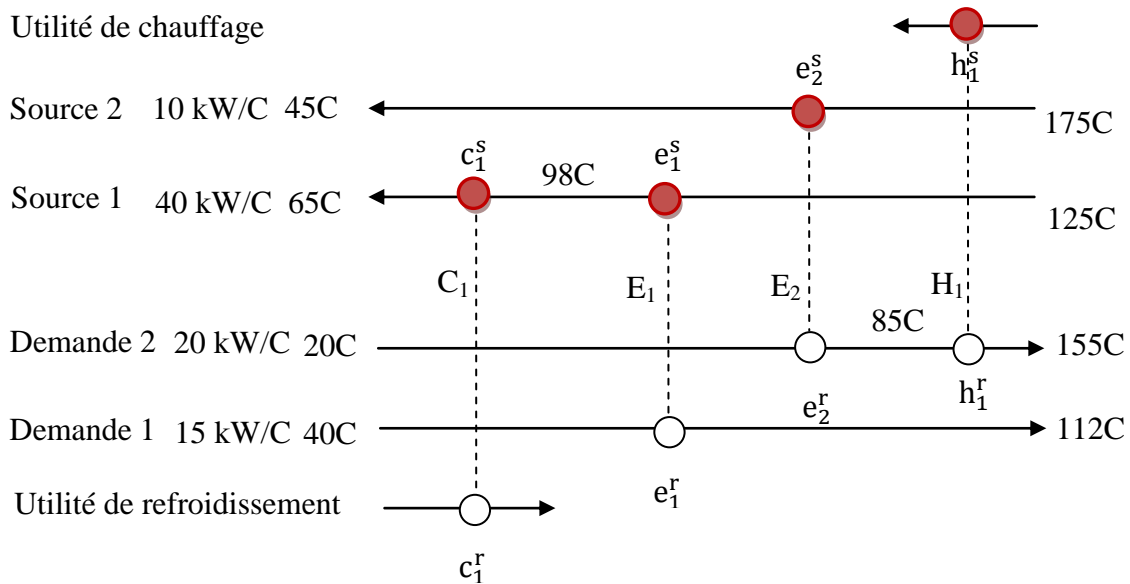


Figure 4-2 Exemple de réseau d'échangeurs de chaleurs

4.2.2 Extraction de données

Étant donné que la méthode pontale considère les contraintes propres à chaque connexion, la terminologie et l'extraction de données sont explicites. Pour la rétro-installation des réseaux d'échangeurs de chaleur, qu'ils soient à contact direct ou indirect, il est important de suivre les étapes d'extraction de données ci-dessous. Elles consistent à (1) déterminer explicitement les sources et besoins du procédé, (2) déterminer comment celles-ci sont gérées dans le réseau initial, et (3) définir les contraintes pour chaque nouvelle connexion. La seconde étape est spécifique à la situation de rétro-installation.

Étapes pour l'extraction de données :

1. Identifier les sources et demandes en chaleur du procédé. Déterminer pour celles-ci la chaleur spécifique (kW/°C) en fonction de la température, et la température des extrémités froide et chaude.

2. Déterminer comment les sources et demandes sont gérées dans le réseau initial, ce qui implique de décomposer les sources en fournisseurs et les demandes en récepteurs. Déterminer pour chaque fournisseur et récepteur la chaleur spécifique (kW/°C) en fonction de la température, et la température des extrémités froide et chaude.
3. Définir les contraintes propres à chaque couple possible fournisseur-récepteur. Les principales sont la faisabilité pratique (estimation coût), le type de transfert (direct ou indirect), et la différence minimale de température permise. Cette dernière peut être estimée par l'expérience et varie selon des données économiques, telles que le prix de la vapeur provenant des utilités de chauffage et refroidissement, la surface d'échange, la durée de projet et le taux d'intérêt.

4.2.3 Pont de chaleur

Réduire la consommation de chaleur implique de diminuer le débit de chaleur transféré entre les utilités de chauffage et l'environnement au travers des échanges. Cette section décrit l'ensemble fondamental de modifications permettant de réduire la consommation de chaleur, appelé 'Pont de chaleur'. Les caractéristiques des ensembles fondamentaux étant explicitées, l'énumération des possibilités de réduction est beaucoup plus simple, claire et systématique. Le concept de pont pourra ensuite être utilisé soit dans les approches de rétro-installation basées sur l'analyse et le raisonnement (insight-based methods) soit dans les approches basées sur l'optimisation numérique.

Un pont de chaleur représente un ensemble de modifications dans le réseau d'échangeurs de chaleur strictement nécessaires afin de réduire la consommation d'énergie. Un pont premier ne peut pas être décomposé en d'autres ponts et est un ensemble de l'une des deux formes suivantes :

$$A. \{c_x^s h_z^r\}$$

$$B. \{c_x^s e_{y1}^r, e_{y1}^s e_{y2}^r, \dots, e_{yn-1}^s e_{yn}^r, e_{yn}^s h_z^r\}$$

Où x est l'indice d'un refroidisseur C , z l'indice d'un réchauffeur H , et $\{y1, \dots, yn\}$ un sous-ensemble de n indices d'échangeurs internes E .

Dans la forme A, la chaleur qui était envoyée à l'environnement est utilisée pour un récepteur d'utilité chaude. Dans la forme B, la chaleur qui était envoyée à l'environnement est utilisée pour un récepteur d'échangeur interne, ce qui libère totalement ou partiellement le fournisseur correspondant dont la chaleur est récupérée, et ainsi de suite jusqu'à atteindre le récepteur d'un réchauffeur.

Rappelons que la chaleur évacuée d'une utilité de refroidissement est in fine envoyée à l'environnement. Voici quelques exemples de ponts premiers:

- $\{c_1^s h_1^r\}$
- $\{c_1^s e_1^r, c_1^s e_1^r\}$
- $\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_2^r, e_2^s h_1^r\}$

Les Figures 4-3 présentent des ponts premiers incluant une, deux et trois modifications. Un pont composé peut être décomposé en plusieurs ponts. Voici quelques exemples:

- $\{c_1^s e_1^r, c_1^s h_1^r, e_1^s h_1^r\}$
- $\{c_1^s e_1^r, c_1^s h_1^r, e_1^s e_2^r, e_2^s h_1^r\}$
- $\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_2^r, e_1^s h_1^r, e_2^s h_1^r\}$

Le concept de pont est simple. La chaleur qui était envoyée à l'environnement est utilisée pour satisfaire une demande du procédé, ce qui ultimement a pour résultat une réduction de la consommation d'énergie. La chaleur est récupérée pour un récepteur; si le fournisseur correspondant envoie sa chaleur à l'environnement, l'énergie n'est pas récupérée; le fournisseur correspondant doit donc être connecté à un autre récepteur, soit d'un échangeur interne, soit d'un réchauffeur.

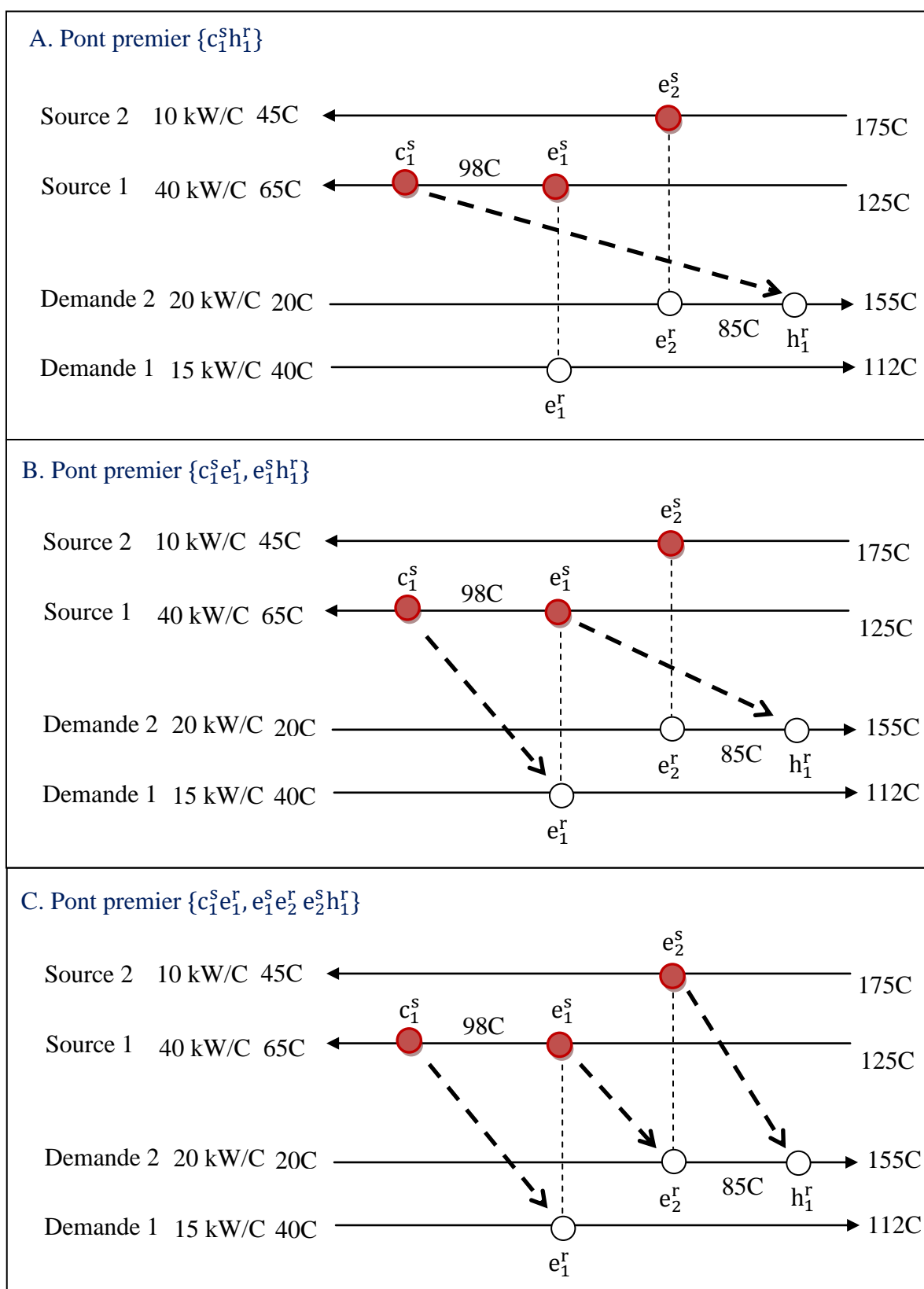
Un pont est un ensemble de nouveaux couples fournisseurs-récepteurs strictement nécessaire pour réduire la consommation de chaleur. Les ponts peuvent être identifiés systématiquement par algorithme ou avec le diagramme de transfert d'énergie qui sera présenté dans ce chapitre. Les nouveaux couples sont désignés par des flèches dans le diagramme de transfert d'énergie. Un nouveau couple implique soit la modification d'un échangeur existant, soit l'ajout d'un

échangeur; la distinction entre ces deux possibilités peut être identifiée avec la table de réseau (voir plus loin).

Le coût correspondant à un nouveau couple dépend de l'investissement dû au placement de nouvelles conduites, l'achat ou la modification d'un échangeur et des pertes de charge. L'approche Matrix développée à Chalmers permet d'évaluer de tels coûts avec précision et peut en principe être utilisée dans la méthode pontale. Les données sur les connexions représentées dans un tableau (matrice, d'où le nom Matrix) peuvent être directement transférées dans la table de réseau dans la méthode pontale.

Distinction entre un pont et un chemin refroidisseur-réchauffeur (cooler-heater path)

Il est important de distinguer un pont d'un chemin. Un réseau inclut un « chemin refroidisseur-réchauffeur », tel que défini par la communauté dans le domaine de la rétro-installation des réseaux d'échangeurs de chaleur à contact indirect, si un refroidisseur et un réchauffeur sont connectés par des lignes horizontales et verticales dans un diagramme grille. La présence d'un chemin dans le réseau initial ou final n'est pas nécessaire pour réduire la consommation d'énergie. Un chemin est une caractéristique structurelle du réseau, et non un ensemble de modifications. Un pont par contre est un ensemble fondamental de modifications permettant de réduire la consommation d'énergie. Les ponts sont identifiés systématiquement sans considération des caractéristiques structurelles. Si des modifications pontales qui ont lieu le long d'un chemin nécessitent un coût d'investissement réduit, le pont correspondant sera identifié avec ses avantages. Notons également que le diagramme de transfert de chaleur qui est présenté plus loin est fondamental; il représente l'effet des deux premiers principes de la thermodynamique dans les procédés industriels. Ce diagramme montre que seulement un pont peut réduire la consommation d'énergie.



Figures 4-3 Ponts premiers

4.2.4 Identification des ponts

Les ponts sont les ensembles fondamentaux de modifications qui permettent de réduire la consommation d'énergie. Une procédure pour énumérer les ponts de façon systématique et efficace a été développée. Elle inclut trois niveaux de sélection, ou filtres. Le premier exclut les couples fournisseur-récepteur inutiles; le second identifie les ponts en utilisant les « Règles Pontales »; le troisième exclut les ponts inutiles de l'énumération.

Premier filtre : sélection des couples fournisseur-récepteur potentiels

Les couples qui ne peuvent être inclus dans un pont premier pertinent sont exclus. Chaque couple est testé selon trois critères successifs. Si un critère ne peut être satisfait pour un couple, le couple est exclu.

- Critère 1 : Le couple est réalisable en pratique, ou son coût fixe est inférieur à une valeur prédéfinie.
- Critère 2 : La capacité d'échange de chaleur du couple est supérieure à une valeur minimale Q_{min}^{couple} . Afin d'évaluer cette capacité, une différence minimale possible de température est spécifiée pour chaque couple.
- Critère 3 : Le couple est inclus dans au moins un pont premier pertinent.

Un pont premier est un ensemble de couples de la forme A ou B (cf. pont de chaleur). Un pont premier est 'pertinent' si un bénéfice correspondant est possible, qui dépend de la réduction de la consommation d'énergie et du coût d'investissement. Le troisième critère implique de lister tous les ponts premiers qui incluent les couples qui réussissent le second test, évaluer leur capacité d'économie d'énergie et estimer leur coût d'investissement. L'ensemble des couples potentiel est obtenu par l'union des ponts premiers pertinents. Par conséquent, cet ensemble initial est une structure pontale. Tous les ponts qui seront identifiés sont des sous-ensembles de cet ensemble initial.

Considérations sur le nombre de couples dans un pont premier

Le nombre maximal de couples dans un pont est théoriquement égal au nombre d'échangeurs internes dans le réseau initial plus un. Cependant le bénéfice correspondant à un pont dépend de l'économie d'énergie et de l'investissement. Les coûts fixes d'investissement augmentent avec le nombre de couples. La capacité d'économie d'énergie des ponts premiers diminue au-delà d'un nombre de couples car elle est limitée par la plus petite capacité d'échange d'énergie des couples inclus dans le pont premier. Par conséquent, le nombre de couples dans un pont premier est en pratique sévèrement limité. Certains ponts premiers incluent un nombre élevé de couples, par exemple cinq, si ceux-ci sont situés sur un chemin refroidisseur-réchauffeur car l'investissement peut être réduit dans ce cas.

Considérations sur les nouveaux couples menant à une perte d'exergie

Chaque nouveau couple libère totalement ou partiellement un fournisseur. Si l'exergie du fournisseur libéré par un nouveau couple est inférieure à celle du fournisseur utilisé, il y a perte d'exergie : le couple est thermodynamiquement inutile et mène à un nouvel « échange croisé » (criss-cross exchange), situation défavorable. La moitié des nouveaux couples mènent à une perte d'exergie. Un couple menant à une perte d'exergie $e_{y1}^s e_{y2}^r$ est toujours joint à un couple correspondant $e_{y2}^s b_m^r$. Ces deux couples peuvent en principe être remplacés par un couple direct $e_{y1}^s b_m^r$ qui conduit à une économie d'énergie supérieure ou équivalente et requiert moins de surface d'échange. Cependant le couple direct peut être difficilement réalisable en pratique ou coûteux. La règle suivante est proposée : un pont premier qui inclut un couple avec perte d'exergie est considéré comme pertinent si son bénéfice (ex. Valeur Actualisée Nette) est supérieur au pont correspondant qui inclut le couple direct.

Second filtre : utilisation de « Règles Pontales » pour identifier les ponts composés

Au premier de niveau de sélection, les ponts premiers ont été identifiés systématiquement avec facilité en listant les refroidisseurs, les échangeurs internes et les réchauffeurs. L'ensemble des couples potentiel a été obtenu par l'union des ponts premiers pertinents. Les ponts composés sont des sous-ensembles de l'ensemble initial. Combiner les ponts premiers peut nécessiter beaucoup d'opérations et être peu efficace car plusieurs combinaisons mènent parfois au même résultat.

Dès lors des « règles pontales » ont été développées afin de minimiser le nombre d'opérations. Le principe est de définir les conditions que doit respecter tout pont. Si un ensemble de couples respecte les règles pontales, cet ensemble est un pont.

Règles pontales:

- Au moins un couple avec le fournisseur c_x^s d'un refroidisseur doit être inclus
- Au moins un couple avec le récepteur h_z^r d'un réchauffeur doit être inclus.
- Chaque couple avec le fournisseur e_y^s d'un échangeur interne implique au moins un autre couple avec son récepteur associé e_y^r .
- Chaque couple avec le récepteur e_y^r d'un échangeur interne implique au moins un autre couple avec le fournisseur associé e_y^s .
- Aucun couple avec le fournisseur h_z^s d'un réchauffeur n'est autorisé.
- Aucun couple avec le récepteur c_x^r d'un refroidisseur n'est autorisé.

Troisième filtre : exclusion des ponts inutiles de l'énumération

L'addition de couples à un pont mène à une augmentation du coût d'investissement et ne peut jamais diminuer la capacité d'économie. Le pont résultant, qui est composite, est considéré « utile » si sa capacité d'économie d'énergie augmente strictement, et est considéré « inutile » dans le cas contraire. Le principe de ce filtre est d'ajouter seulement à un pont utile un nombre minimal de couples de sorte que les règles pontales soient satisfaites. L'énumération s'arrête quand la capacité d'économie n'augmente plus ou quand un nombre prédéfini de couples inclus dans un pont est atteint. La procédure suivante est proposée :

- Les ponts de départ sont les ponts premiers de l'ensemble des couples potentiels.
- Étape d'ajout : un nombre minimal de couples est ajouté à un pont utile selon les règles pontales.
- Le pont résultant est utile si sa capacité d'économie du pont augmente strictement.
- Si le nombre de couples dans un pont utile est inférieur à une valeur maximale, retour à l'étape d'ajout.

Par conséquent les ponts utiles, qui incluent le nombre minimum de couples, sont identifiés. Les autres ponts sont exclus. Ce filtre est efficace particulièrement lorsque l'ensemble initial inclut un grand nombre de couples.

4.2.5 Évaluation des ponts

La capacité de réduction d'énergie d'un pont peut facilement être évaluée par Programmation Linéaire (LP). Un modèle de transport (transportation) ou un modèle de transbordement (transshipment) basé sur une cascade de chaleur peut être utilisé [109 et 110]. Dans le modèle de transport, la chaleur est transférée directement d'un intervalle de température de fournisseur à un intervalle de température de récepteur; l'information sur le transfert est gardée. Le modèle de transbordement utilise le principe de cascade de chaleur : à chaque intervalle de température la chaleur en excès est cascadée à plus basse température. Par conséquent la chaleur cascadée peut venir de n'importe quel intervalle de température supérieure. Cela permet de réduire le nombre de variables mais il y a perte importante d'information. Il n'est plus possible d'estimer la surface d'échange nécessaire (qui dépend de la différence de température dans le transfert) ni d'identifier la topologie du réseau. Le modèle de transbordement est cependant le plus utilisé dans le domaine de l'intégration énergétique. Le Tableau 4.3 présente une comparaison des deux modèles. Les possibilités d'utilisation du modèle de transport incluent toutes les possibilités du modèle de transbordement. Le modèle de transport a été choisi pour la méthode pontale car il permet de plus d'estimer la surface d'échange, et d'identifier complètement la topologie du réseau correspondant à un pont avec l'ajout de variables binaires (formulation jointe dans l'annexe 5). Ce modèle décrit mieux le phénomène d'échange de chaleur, est plus intuitif, et convient parfaitement à la table de réseau. Le seul avantage du modèle de transbordement est la réduction du nombre de variables. Le nombre de variables dépend du nombre de fournisseurs n_s , du nombre de récepteurs n_r , et du nombre d'intervalles de température n_τ selon la formule décrite dans la table. Si le nombre d'intervalles de température est égal à 10, le nombre de variables pour le modèle de transport est égal à 5 fois celui pour le transbordement. Cette différence pouvait être réellement appréciée et importante dans les années 1980 mais l'est beaucoup moins maintenant. Ainsi la capacité d'économie d'un pont dans un réseau composé d'échanges à contact direct ou indirect peut être évaluée facilement pour les deux modèles avec un solveur Excel.

Tableau 4.3 Comparaison des modèles de transfert de chaleur

Critère	Modèle de transbordement	Modèle de transport
Nombre de variables	$n_s * n_r * n_i$	$n_s * n_r * \frac{n_i^2}{2}$
Possibilité d'évaluer la capacité d'économie pour les échanges à contact indirect	oui	oui
Possibilité d'évaluer la capacité d'économie pour les transferts directs	oui	oui
Possibilité d'évaluer la surface d'échange	non	oui
Possibilité d'identifier la topologie correspondant à un pont	non	oui

La topologie finale du réseau résultant de modifications pontales peut être identifiée soit par analyse basée sur l'ingénierie soit par optimisation. L'approche par optimisation nécessite l'utilisation de variables binaires afin de considérer les contraintes de conception. Les formulations MILP développées par Pettersson [111] et Barbaro *et al* [46] sont particulièrement pertinentes; elles sont basées sur le modèle de transport, qui convient à la table de réseau. La formulation proposée par Pettersson a servi de base à la nôtre. Les principales différences sont les suivantes :

- La formulation de Pettersson a été développée pour la conception de nouveaux réseaux. Les sources et les demandes ne sont donc pas décomposées en fournisseurs et récepteurs. La décomposition en intervalles de température est ainsi différente.
- La formulation de Pettersson ne considère pas la configuration à co- ou contre-courant des échangeurs de chaleur. Nous avons rajouté les contraintes relatives à la configuration.

Rappelons que les variables de décision sont limitées à celles relatives aux modifications pontales. L'espace de recherche est donc fortement réduit dans l'analyse pontale. Un modèle MINLP basé sur une superstructure peut également être envisagé. A nouveau, l'avantage de l'analyse pontale réside en ce que la taille du problème d'optimisation est fortement réduite. Le choix d'une topologie doit aussi considérer certains critères d'opérabilité, tels que la flexibilité, la contrôlabilité, la sécurité, le démarrage et l'arrêt de la production. La formulation permettant d'identifier la topologie finale du réseau est présentée dans l'annexe 5.

4.2.6 Table de réseau

Une table a été développée pour faciliter l'identification et l'évaluation des ponts. L'idée d'une table est venue naturellement; son caractère bidimensionnel convient à la représentation des transferts de chaleur entre une source et une demande en général. Dans un premier temps, l'intérêt d'utiliser un tel outil est devenu évident lors d'une réflexion pour identifier de façon systématique et efficace les ponts. Les concepts d'exclusion des couples inutiles de l'ensemble initial, d'utilisation de règles pontales pour identifier les ponts composites, et d'exclusion des ponts inutiles de l'énumération ont été développés en utilisant une table. Par la suite la table s'est révélée très pratique pour évaluer la capacité d'économie d'un pont et identifier la topologie finale du réseau.

Dans la table de première décomposition les sources et les demandes sont décomposées en fournisseurs et récepteurs, respectivement. Elle offre une vision sur l'ensemble des possibilités de rétro-installation. Dans la table de seconde décomposition les fournisseurs et récepteurs sont à leur tour décomposés en intervalles de température dans lesquels la chaleur peut ou ne peut pas être transférée. Cette table permet d'évaluer les modifications, ex. les débits de chaleur, la surface d'échange et la topologie finale du réseau.

Table de première décomposition

Dans cette table les lignes correspondent à des fournisseurs, et les colonnes correspondent à des récepteurs. Chaque cellule représente un couple fournisseur-récepteur. Des lignes séparent les sources entre elles et les demandes entre elles. Des informations correspondant aux couples peuvent être ajoutées, par ex. la faisabilité pratique, le coût d'investissement, la différence de

température, la capacité d'échange de chaleur ou la variation d'exergie. Le Tableau 4.4 présente les capacités d'échange en kW pour chaque couple en considérant une différence minimale autorisée de température égale à 10°C. La capacité d'échange des couples qui n'existent pas dans le réseau initial est affichée entre parenthèses. Nous pouvons remarquer que le réseau initial n'inclut aucune boucle et aucun chemin refroidisseur-réchauffeur, que les nouveaux couples $c_1^s e_2^r$ et $c_1^s h_1^r$ nécessitent ensemble seulement une nouvelle connexion entre la source 1 et la demande 2, et que les couples $c_1^s e_1^r$ et $e_2^s h_1^r$ ne nécessitent aucune nouvelle connexion mais seulement des modifications dans les échangeurs.

Tableau 4.4 Table de première décomposition du réseau initial avec capacité d'échange

Source 2	e_2^s	1300	(1300)	(1080)	1300	(800)
Source 1	e_1^s	1080	(1080)	1080	(1080)	(600)
	c_1^s	1320	1320	(720)	(1300)	(60)
Utilité chaude	HU	1400	Économie	(1080)	(1300)	1400
		1320		1080	1300	1400
CU				e_1^r	e_2^r	h_1^r
Env.				Demande 1		Demande 2

Évaluation de la borne supérieure du débit de chaleur au travers des couples en série

Le débit au travers des couples en série est limité par la capacité d'échange minimale des couples impliqués. Par exemple le débit de chaleur au travers des ponts premiers de notre exemple est limité par les bornes suivantes (la capacité d'échange de chaque couple est indiquée entre parenthèses) :

$\{c_1^s h_1^r (60\text{kW})\}$	Capacité d'économie = 60 kW
$\{c_1^s e_1^r (720\text{kW}), e_1^s h_1^r (600\text{kW})\}$	Capacité d'économie = 600 kW
$\{c_1^s e_2^r (1300\text{kW}), e_2^s h_1^r (800\text{kW})\}$	Capacité d'économie = 800 kW
$\{c_1^s e_1^r (720\text{kW}), e_1^s e_2^r (1080\text{kW}), e_2^s h_1^r (800\text{kW})\}$	Capacité d'économie = 720 kW

Le Tableau 4.5 montre le réseau résultant du pont $\{c_1^s e_2^r (1300\text{kW}), e_2^s h_1^r (800\text{kW})\}$. 1300kW ont été transférés de c_1^s à e_2^r ; par conséquent le fournisseur e_2^s est complètement libre et peut transférer 800 kW à h_1^r . L'excès de 500kW est envoyé à l'environnement. La consommation d'énergie a été réduite de 800kW. Cette valeur est inscrite dans la cellule *Économie* à l'intersection des utilités chaude et froide. La somme des débits transférés dans chaque ligne et colonne est constante; ceci est dû au bilan d'énergie.

Tableau 4.5 Table de première décomposition du réseau après modifications pontales

Source 2	e_2^s	1300	500		800
Source 1	e_1^s	1080		1080	
	c_1^s	1320	20		1300
Utilité chaude	HU	1400	800		600
		Économie	1320	1080	1300
		CU		e_1^r	e_2^r
		Env.		Demande 1	h_1^r
					Demande 2

Les étapes nécessaires pour construire la table de première décomposition sont les suivantes :

1. Décomposer les sources en fournisseurs et les récepteurs en récepteurs selon le réseau initial.
2. Déterminer pour chaque fournisseur et récepteur la charge de chaleur et les températures d'extrémités chaude et froide.
3. Déterminer la faisabilité pratique pour chaque nouveau couple.
4. Ajouter l'information dans les cellules, par ex. la capacité d'échange des couples pratiques.

Cette table est pratique pour représenter l'ensemble initial des couples, c'est-à-dire après exclusion des couples inutiles.

Table de seconde décomposition

Afin d'évaluer les débits de chaleur au travers un ensemble de couples, les fournisseurs et récepteurs sont à leur tour décomposés. Seulement la partie du fournisseur à une température supérieure à celle de la température de l'extrémité froide T_c du récepteur plus ΔT_{\min} est utilisable pour le transfert. De même, seulement la partie du récepteur à une température inférieure à celle de la température de l'extrémité chaude T_h du fournisseur moins ΔT_{\min} est utilisable pour le transfert. Par conséquent la quantité de chaleur qui peut être transférée est toujours comprise entre zéro et le minimum entre la charge de chaleur de la partie utilisable du fournisseur et celle de la partie utilisable du récepteur.

La décomposition en intervalles de température pour notre exemple est présentée à la Figure 4.4. Une différence minimale permise de température égale à 10°C pour chaque couple a été préalablement choisie.

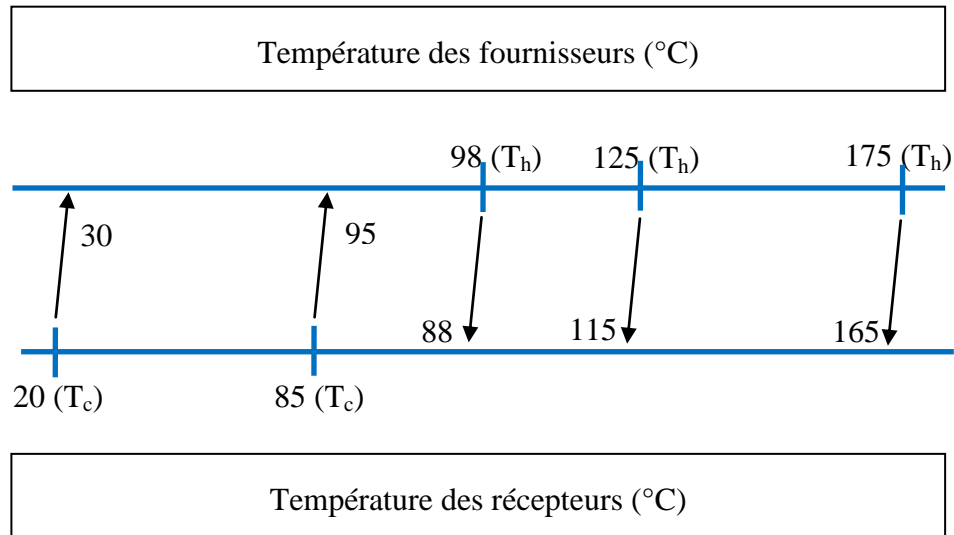


Figure 4-4 Décomposition en intervalles de température pour notre exemple

La table de seconde décomposition correspondant à une configuration à contre-courant pour les échanges initiaux de notre exemple est présentée dans le Tableau 4.6. Les variables sont les débits de chaleur dans les cellules en kW et les fractions d'utilisation des fournisseurs et récepteurs dans chaque intervalle de température. Un réseau est complètement défini soit par les débits de chaleur dans les cellules, soit par les fractions d'utilisation et la configuration des échanges (co- ou contre-courant). Au travers des modifications, la somme des débits de chaleur est constante dans chaque ligne et colonne. Les changements dans la consommation d'énergie sont indiqués dans la cellule à l'intersection des utilités chaude et froide. Le Tableau 4.7 présente le réseau après la modification pontale $\{c_1^s h_1^r\}$.

Les étapes nécessaires pour construire la table sont les suivantes :

1. Décomposer les sources et demandes en fournisseurs et récepteurs, respectivement.
2. Déterminer pour chaque fournisseur et récepteur la charge de chaleur et les températures d'extrémités chaude et froide.
3. Déterminer la faisabilité pratique pour chaque nouveau couple.
4. Décomposer chaque fournisseur et récepteur en intervalles de température.
5. Distinguer les zones où la chaleur peut ou ne peut pas être transférée.
6. Ajouter les données correspondant au réseau initial.

Tableau 4.6 Table de seconde décomposition correspondant au réseau initial

[illegible]

Utilisation de la table pour évaluer des modifications

L'évaluation de la capacité d'économie d'un pont correspond à un simple problème de programmation linéaire qui peut facilement être résolu avec le solveur Excel ou tout autre. Les variables du modèle de transport sont explicites dans la table de seconde décomposition. La fonction de l'objectif représente l'économie d'énergie. Les variables de décision sont les débits de chaleur dans les cellules. Les contraintes sont les suivantes : la somme des débits de chaleur dans chaque ligne et colonne est constante; les débits doivent être positifs; et seulement les débits au travers des couples impliqués dans le pont peuvent être modifiés. La surface d'échange peut également être estimée; elle est proportionnelle au débit de chaleur dans chaque cellule.

La topologie finale du réseau peut être identifiée soit par analyse d'ingénierie soit par optimisation. Dans l'approche par optimisation l'utilisation de variables binaires est nécessaire pour considérer les contraintes topologiques, qui sont liées aux fractions d'utilisation dans chaque intervalle de température. Dans la formulation basée sur le modèle de transport, un échangeur doit avoir les fractions d'utilisation identiques dans chaque intervalle de température participant au transfert; seulement la première et la dernière fraction d'utilisation de la séquence d'intervalles de température peut avoir une valeur inférieure pour indiquer que le transfert ne commence pas nécessairement aux frontières de l'intervalle. La formulation MILP proposée par Pettersson [111] est basée sur le modèle de transport et a été développée pour la conception de nouveaux réseaux. Elle a été adaptée pour notre situation en rétro-installation. Les variables de décision sont limitées à celles du pont; par conséquent l'espace de recherche est réduit.

Les formulations permettant d'évaluer la capacité de réduction d'énergie d'un pont, le coût de la surface, et d'identifier la topologie finale du réseau sont présentées dans l'Annexe 5.

4.2.7 Extension de la méthode pontale aux transferts directs de chaleur

La méthode pontale a d'abord été développée pour les échanges de chaleur à contact indirect. Cependant la consommation d'énergie peut aussi être réduite par des modifications des transferts directs de chaleur, qui impliquent des réallocations de courants. Les transferts directs sont particulièrement importants dans l'industrie papetière, où la consommation d'eau est élevée et les interactions entre réseaux de chaleur et d'eau étroites. Grâce au fait que les contraintes de

connexion sont explicites dans la méthode pontale, l'extension de celle-ci aux transferts directs est simple et naturelle. Les deux règles relatives aux transferts directs sont les suivantes :

- La température d'extrémité froide des sources et demandes en eau chaude est égale à celle de l'environnement.
- La différence minimale de température permise entre la source et la demande égale zéro.

Toute réduction de la consommation de chaleur implique de diminuer le débit de chaleur transféré des utilités chaudes jusqu'à l'environnement, où la dégradation est maximale. La chaleur dans l'eau au-dessus de la température d'environnement peut être récupérée par échange à contact indirect ou réallocation. De même une demande en eau chaude peut être satisfaite par échange à contact indirect ou en utilisant directement de l'eau chaude. Par conséquent la température d'extrémité froide des sources et demandes d'eau chaude est celle de l'environnement. Ceci est dû au fait que la réallocation est possible. Remarquons qu'il est toujours correct de spécifier comme température d'extrémité froide celle de l'environnement pour un courant qui n'est pas de l'eau mais que cela est inutile si la réallocation de ce courant est interdite (du fait de sa composition, il doit être envoyé vers une unité d'opération déterminée).

Si un transfert direct de chaleur dans un couple est possible, la différence minimale de température permise égale zéro. Le modèle de mélange parfait implique qu'aucune différence de température n'est nécessaire pour cette opération.

Remarquons que la première règle concerne les deux premières étapes de l'extraction de données; la deuxième concerne la troisième étape. Ces règles sont conformes au bon sens. Leur simplicité vient du fait que la méthode pontale spécifie les contraintes propres à chaque connexion.

4.2.8 Diagramme de transfert d'énergie

Le diagramme de transfert d'énergie permet de visualiser les effets des deux premiers principes de la thermodynamique de conservation et dégradation de l'énergie dans chaque opération et échange de chaleur et au niveau de l'usine. Il permet d'identifier les modifications dans le réseau d'échangeurs de chaleur conduisant à une réduction de consommation d'énergie (ponts), les modifications des opérations de procédé conduisant à une réduction de consommation d'énergie, et d'analyser le système énergétique global du site industriel. Dans les procédés industriels la chaleur est transférée des utilités chaudes jusqu'à l'environnement ou bien convertie en une autre

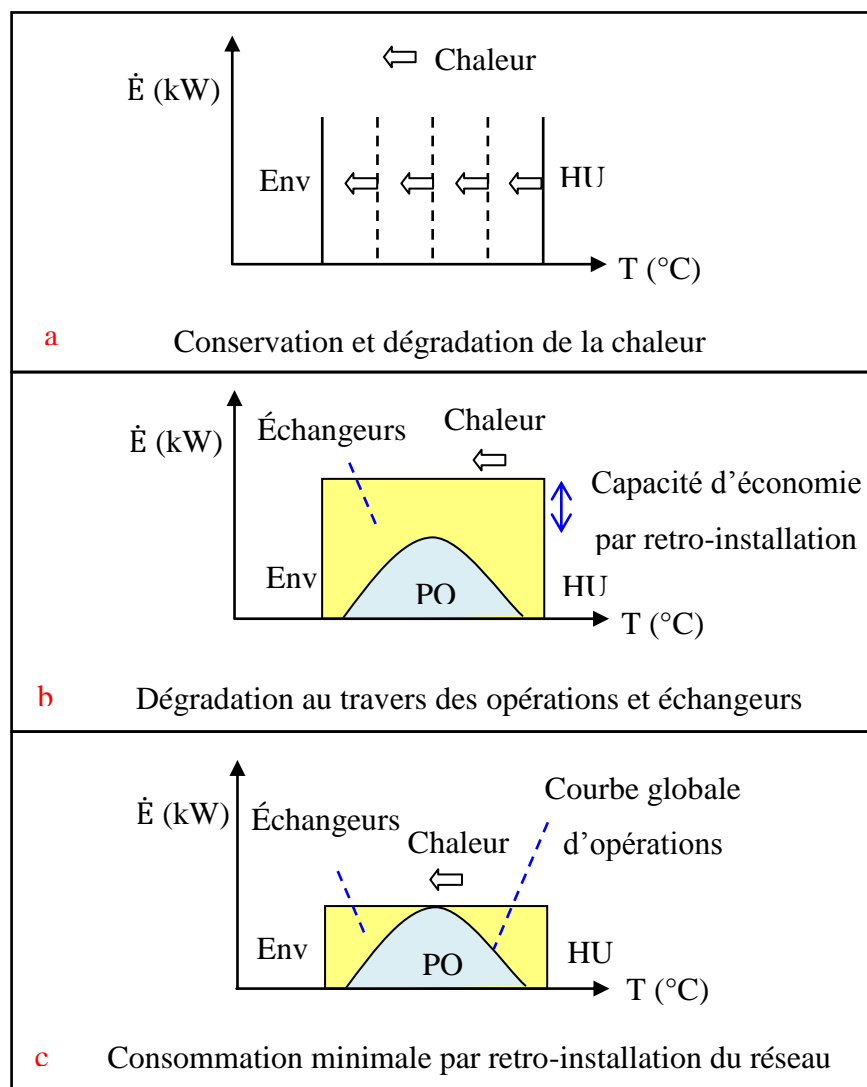
forme d'énergie. Les opérations de procédé et les échanges de chaleur dégradent la qualité de l'énergie; l'énergie est conservée mais l'entropie augmente. L'environnement correspond au niveau maximal de dégradation. Seront présentés successivement les principes du diagramme, l'évaluation de la courbe de transfert d'énergie correspondant à un système, et les possibilités d'utilisation. Dans ce qui suit, « opération de procédé » désigne une opération autre qu'un échange de chaleur.

Principe

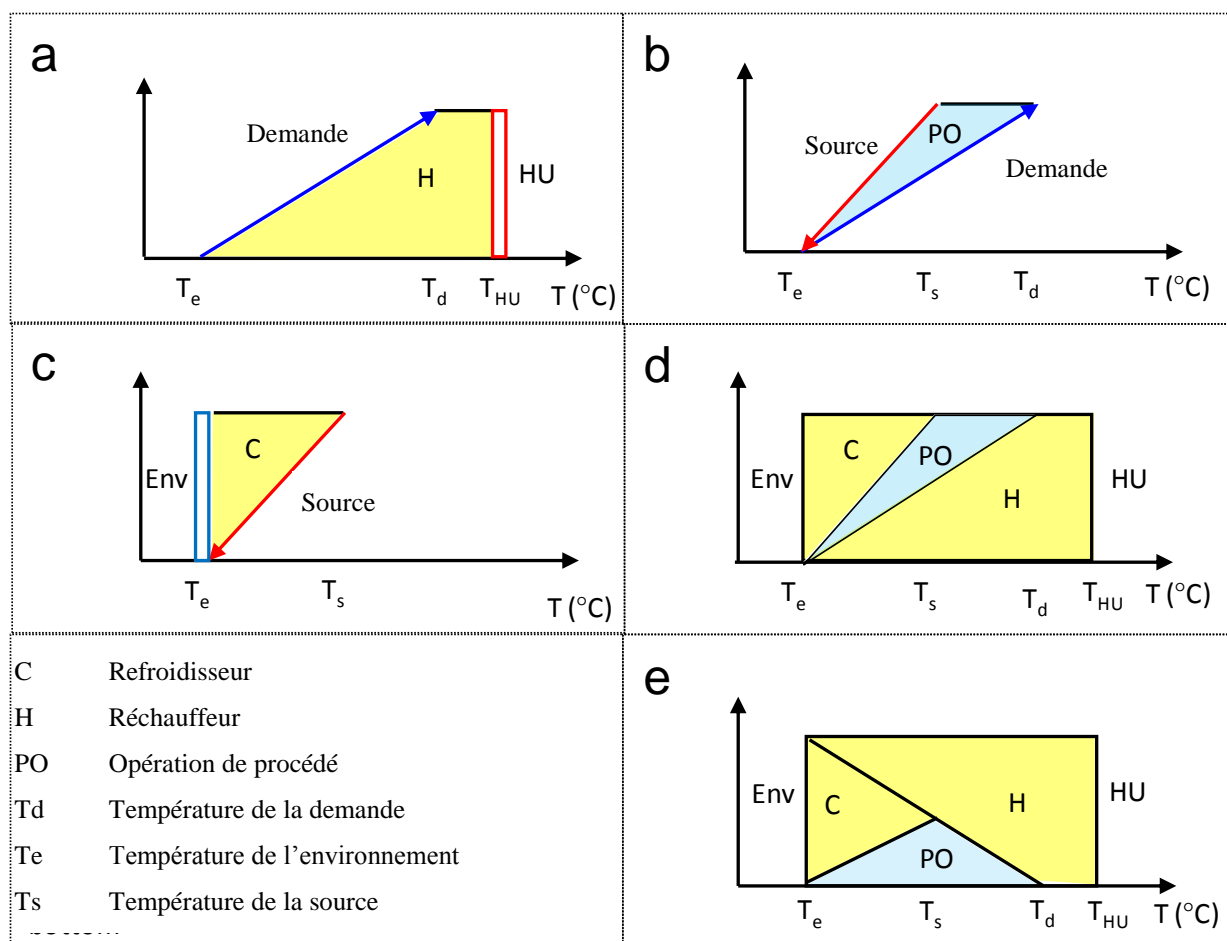
La chaleur émise par les utilités chaudes peut être dégradée jusqu'à son niveau maximal, celui de l'environnement. L'énergie cinétique des molécules au niveau des utilités chaudes, dont les mouvements sont désordonnés, est graduellement transmise à un nombre croissant de molécules dont l'énergie cinétique est moindre, jusqu'à l'environnement.

Dans le diagramme, l'axe d'ordonnée représente le débit d'énergie transférée \dot{E} , et l'abscisse représente la température. Le débit d'énergie traversant chaque niveau de température à partir des utilités chaudes jusqu'à l'environnement est évalué par bilan pour un système, dont les limites peuvent inclure une opération de procédé, un échangeur de chaleur, un département ou l'ensemble du site industriel. Le diagramme correspondant à un procédé dans lequel la chaleur n'est pas convertie en une autre forme d'énergie a une forme rectangulaire; cette forme montre que l'énergie est conservée à chaque niveau de température et est progressivement dégradée des utilités chaudes jusqu'à l'environnement par les opérations et échangeurs de chaleur. La courbe d'opération est la limite entre les zones des opérations et des échangeurs. Un ensemble de modifications qui réduit le débit de chaleur transféré des utilités chaudes jusqu'à l'environnement, c'est-à-dire un pont, est nécessaire pour réduire la consommation d'énergie. Le minimum de la consommation de chaleur qui peut être atteint par rétro-installation du réseau d'échangeurs de chaleur est égal au maximum de la courbe globale d'opération. La courbe globale d'opérations peut être abaissée par des modifications dans le procédé (Figures 4.5). Les Figures 4.6 présentent une situation dans laquelle la chaleur n'est pas convertie dans une autre forme d'énergie. La figure a montre le débit de chaleur transférée entre une utilité chaude HU et une demande de procédé au travers d'un réchauffeur H . Le débit augmente de la température de l'environnement T_e jusqu'à celle de la demande T_d car la chaleur transmise par l'utilité chaude est progressivement captée par la demande. La figure b montre la dégradation de la chaleur au

travers d'une opération PO , par exemple un mélange avec un courant à la température de l'environnement. Le courant de demande en chaleur alimente l'opération; la chaleur est dégradée, et ressort sous la forme d'une source à plus basse température T_d . Cette chaleur est alors envoyée à l'environnement au travers d'un refroidisseur C (Figure c). Le débit de chaleur dégradée est identique entre les utilités chaudes et l'environnement (Figure d). Ceci est l'expression des deux premiers principes de la thermodynamique de conservation et dégradation de l'énergie. Trois zones de dégradation sont visibles, H , PO , et C . La Figure d peut être réarrangée de sorte que la zone correspondant à l'opération de procédé soit placée dans le bas (Figure e).



Figures 4-5 Diagramme de transfert d'énergie et consommation minimale



Figures 4-6 Débit identique de chaleur entre l'utilité chaude et l'environnement

Évaluation de la courbe de transfert d'énergie d'un système

Le débit d'énergie \dot{E} traversant la température T résulte du bilan d'énergie; il est égal à la différence entre les débits de chaleur cumulée à l'entrée et à la sortie du système en considérant l'environnement pour référence (équation 4).

$$\dot{E}(T) = \sum_o \dot{h}_o(T) - \sum_i \dot{h}_i(T) \quad \text{Équation 4}$$

$$\dot{h}_o(T) = \dot{m}_o * (H_o(T) - H_o(T_e)) \quad \text{si } T \leq T_o$$

$$\dot{h}_o(T) = \dot{m}_o * (H_o(T_o) - H_o(T_e)) \quad \text{si } T > T_o$$

$$\dot{h}_i(T) = \dot{m}_i * (H_i(T) - H_i(T_e)) \quad \text{si } T \leq T_i$$

$$\dot{h}_i(T) = \dot{m}_i * (H_i(T_i) - H_i(T_e)) \quad \text{si } T > T_i$$

Avec

$\dot{E}(T)$: Débit d'énergie transférée à travers la température T , kW

$\dot{h}_i(T)$: Débit de chaleur cumulée de l'entrée i à la température T , kW

$\dot{h}_o(T)$: Débit de chaleur cumulée de la sortie o à la température T , kW

$H_i(T)$: Enthalpie massique de l'entrée i à la température T , kJ/kg

$H_o(T)$: Enthalpie massique de la sortie o à la température T , kJ/kg

\dot{m}_i : Débit massique de l'entrée i , kg/s

\dot{m}_o : Débit massique de la sortie o , kg/s

T_e : Température de l'environnement

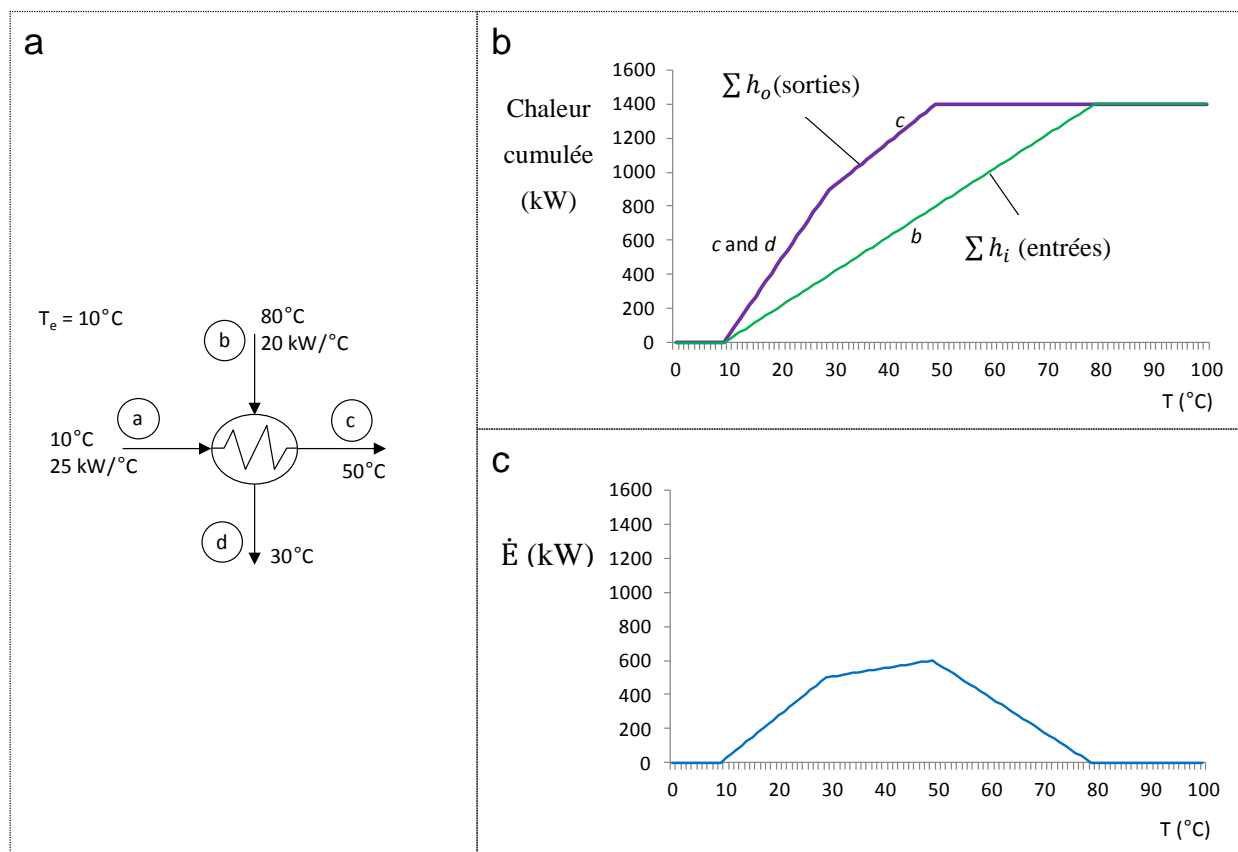
T_i : Température de l'entrée i

T_o : Température de la sortie o

En utilisant la terminologie de l'analyse de pincement, la courbe de transfert d'énergie est la différence entre la courbe composite des sorties et la courbe composite des entrées du système. Le système peut être un échangeur, une opération, un département, une usine, etc. Deux exemples sont décrits ci-après, la courbe de transfert d'un échangeur et celle d'un système de colonne de distillation.

Courbe de transfert d'énergie d'un échangeur de chaleur

Les Figures 4-7a, 4-7b et 4-7c présentent un exemple d'échangeur de chaleur à contact indirect, le débit de chaleur cumulée des entrées et sorties, et la courbe de transfert, respectivement. La température de l'environnement est supposée égale à 10°C. Le débit de chaleur transférée augmente avec la charge de l'échangeur et la différence de température. Les ponts les plus rentables impliquent souvent des modifications d'échangeurs dont le débit de chaleur cascadiée est grand et étendu sur un large intervalle de température. Il sera montré plus loin comment identifier les ponts d'énergie avec le diagramme.



Figures 4-7 Courbe de transfert de chaleur pour un échangeur

Courbe de transfert d'énergie d'une colonne à distillation

La Figure 4.8a présente une colonne de distillation avec ses entrées et sorties. Une perte vers l'environnement est supposée. Les températures au pied et au sommet de la colonne égalent 80°C et 30°C , respectivement. Les débits de chaleur cumulée à l'entrée et la sortie augmentent à partir de la température de l'environnement, égale à 10°C , jusqu'à la température des courants au niveau de l'opération, comme montré à la Figure 4.8b. La courbe de transfert d'énergie, qui est la différence entre les débits de chaleur cumulée à la sortie et l'entrée est présentée à la Figure 4.8c.

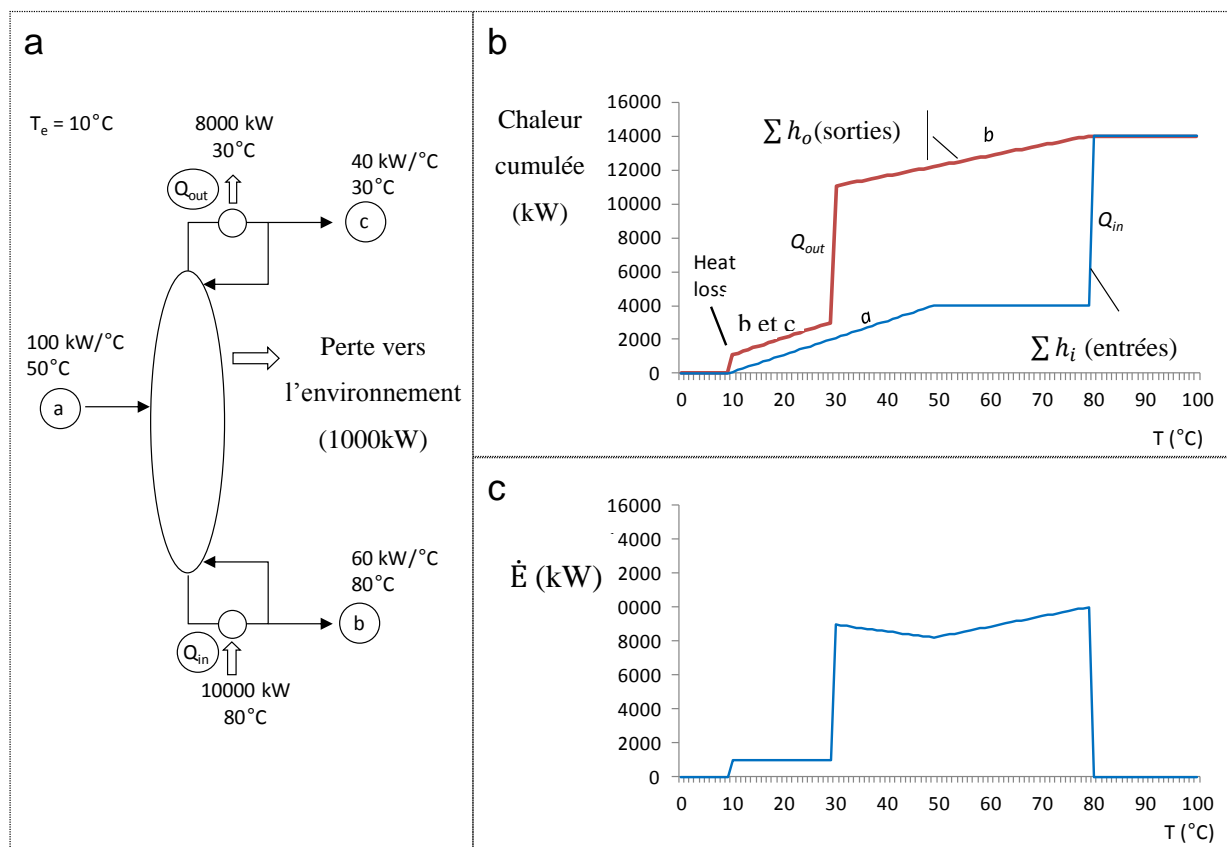


Figure 4-8 Courbe de transfert de chaleur pour un système de colonne de distillation

Comment utiliser le diagramme de transfert d'énergie

Le diagramme permet d'identifier les modifications dans le réseau d'échangeurs de chaleur et les opérations de procédé de réduction de la consommation d'énergie, et d'analyser l'ensemble du site industriel.

Identification facile des ponts

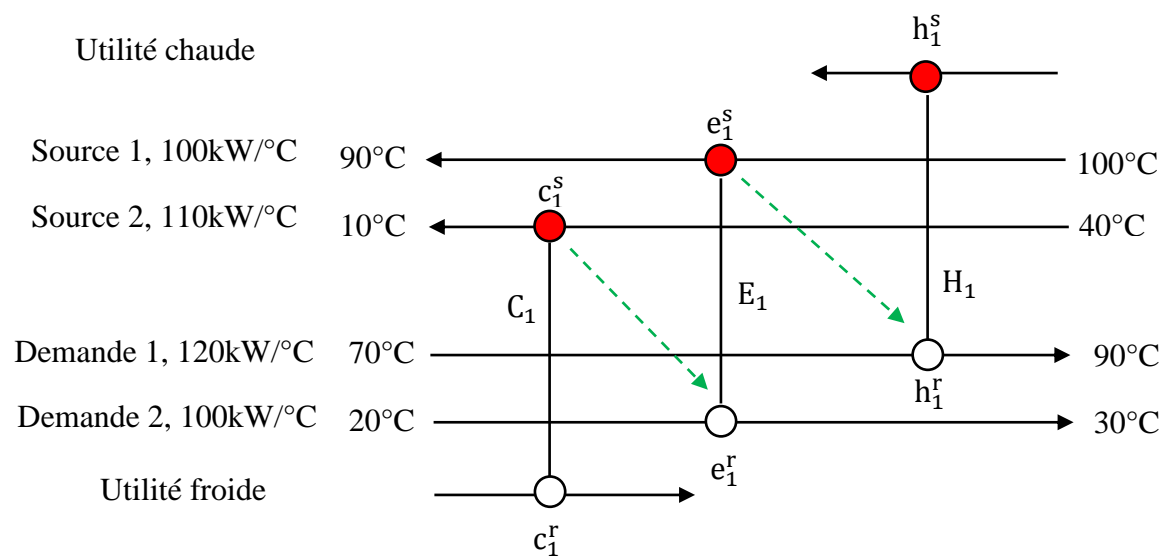
Réduire la consommation de chaleur par des modifications dans un réseau implique de réduire le débit de chaleur cascadiée au travers des échanges entre des utilités chaudes et l'environnement. Ces modifications doivent établir un pont entre les sorties de chaleur vers l'environnement et des récepteurs de réchauffeur. Tous les ponts sont visibles sur le diagramme.

Si les opérations de procédé sont inchangées, la consommation minimale qui peut être atteinte sans contrainte de connexion égale le maximum de la courbe globale d'opération (Figures 4.5). Le minimum de consommation qui respecte les contraintes de différence de températures entre les sources et demandes est égal au maximum de la courbe globale d'opération après déplacement le long de l'abscisse des sources et demandes d'une distance égale à leur contribution (représentée par $\Delta T/2$). Les Figures 4-9a et 4-9b présentent un exemple de réseau d'échangeurs avant rétro-installation et après rétro-installation conduisant au minimum de la consommation d'énergie, respectivement. Les diagrammes de transfert d'énergie avant et après rétro-installation sont présentés sur les Figures 4-10a and 4-10b, respectivement. Ces diagrammes n'ont pas une forme rectangulaire car la dégradation d'énergie due aux opérations n'est pas représentée; l'attention est portée sur les modifications dans le réseau. La capacité d'économie d'énergie est égale à la valeur minimale du débit de chaleur dans le réseau entre les utilités chaudes et l'environnement, 1000kW. Le diagramme du réseau avant initial de la Figure 4-10a montre que l'utilisation du fournisseur du refroidisseur C_1 pour le récepteur de l'échangeur interne E_1 permet de libérer le fournisseur correspondant qui peut alors être utilisé pour le récepteur du réchauffeur H_1 . Par conséquent le pont $\{c_1^s, e_1^r, e_1^s, h_1^r\}$ est nécessaire. Les flèches correspondant aux modifications pontales sont indiquées sur la Figure 4-10a. La Figure 4-10b montre que les modifications pontales ont pour effet de réduire le débit de chaleur transférée sur l'ensemble de la gamme de température entre une utilité chaude et l'environnement. La Figure 4-11 permet de comprendre cet effet : le transfert de x kW du fournisseur c_1^s au récepteur e_1^r libère

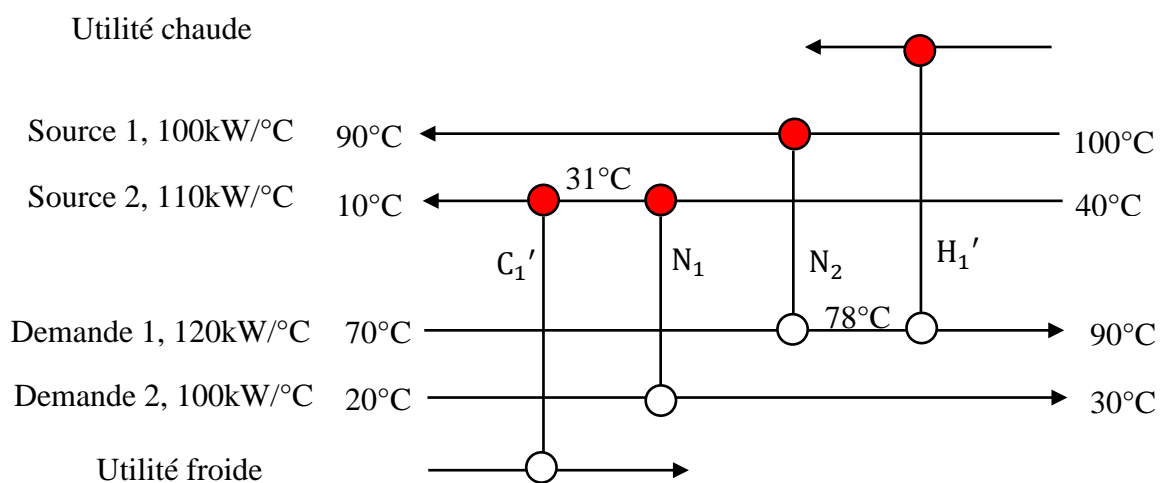
le fournisseur e_1^s de la même quantité de chaleur qui est alors utilisée pour le récepteur h_1^r , ce qui réduit de la même quantité la chaleur fournie par l'utilité chaude.

Tous les ponts peuvent être identifiés sur le diagramme. Si les courbes de transfert d'énergie avec une température plus élevée d'extrémité chaude du fournisseur sont classées en-dessous des autres, alors toute flèche représentant un nouveau couple fournisseur-récepteur orientée vers le bas correspond à un transfert favorable tandis que toute flèche orientée vers le haut correspond à un transfert défavorable (criss-cross match). Un transfert défavorable peut avoir pour conséquence une réduction de la capacité d'économie d'énergie, une augmentation de la surface d'échange nécessaire et un nombre plus élevé de modifications. Cependant un tel transfert peut parfois être utile s'il conduit à une réduction du coût d'investissement.

Les liens entre la courbe de débit total de chaleur des figures 4-10 et la courbe composite globale d'une part et les courbes composites avancées d'autre part sont les suivants. La courbe de débit total de chaleur égale la courbe composite globale qui serait obtenue avec une différence minimale de température d'approche égale à zéro et qui aurait été translatée vers le haut d'une quantité égale au potentiel d'économie d'énergie dans le réseau d'échangeurs avant rétro-installation. La courbe de débit total de chaleur est aussi égale à la somme de la courbe théorique de charge de chaleur (THLC) et de la courbe théorique de charge de refroidissement (TCLC) lorsque ces courbes sont obtenues avec une différence minimale entre les échangeurs (EMATD) égale à zéro.

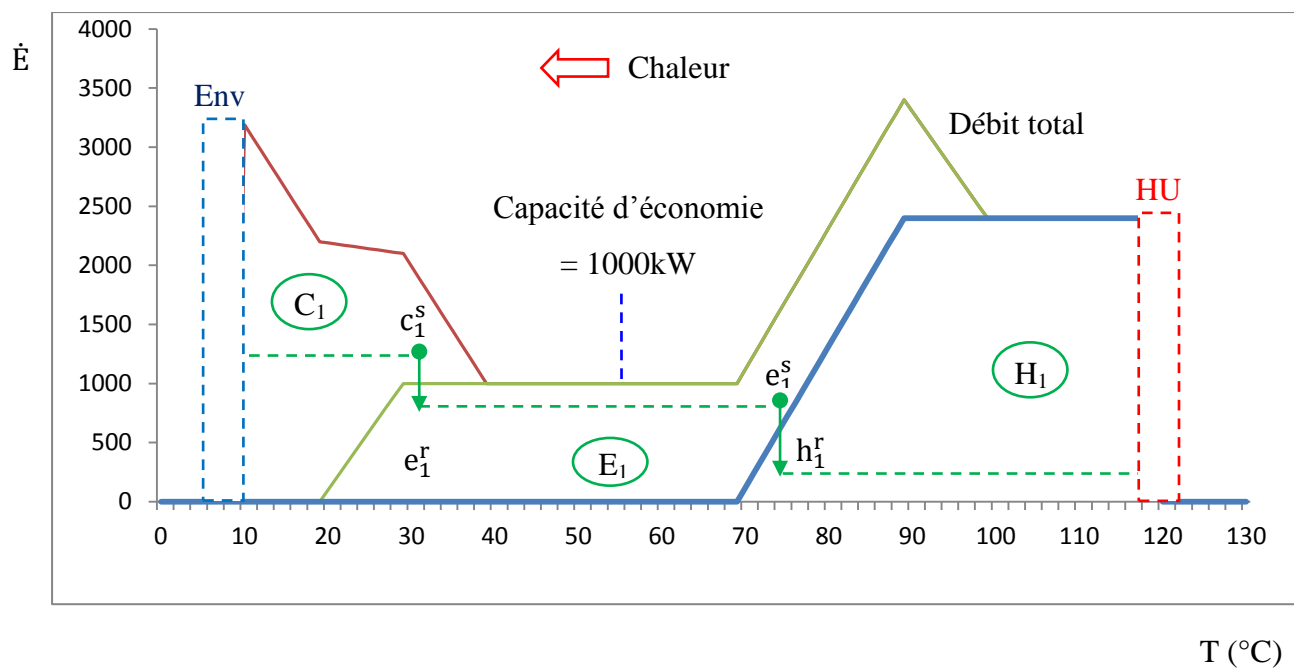


(a)

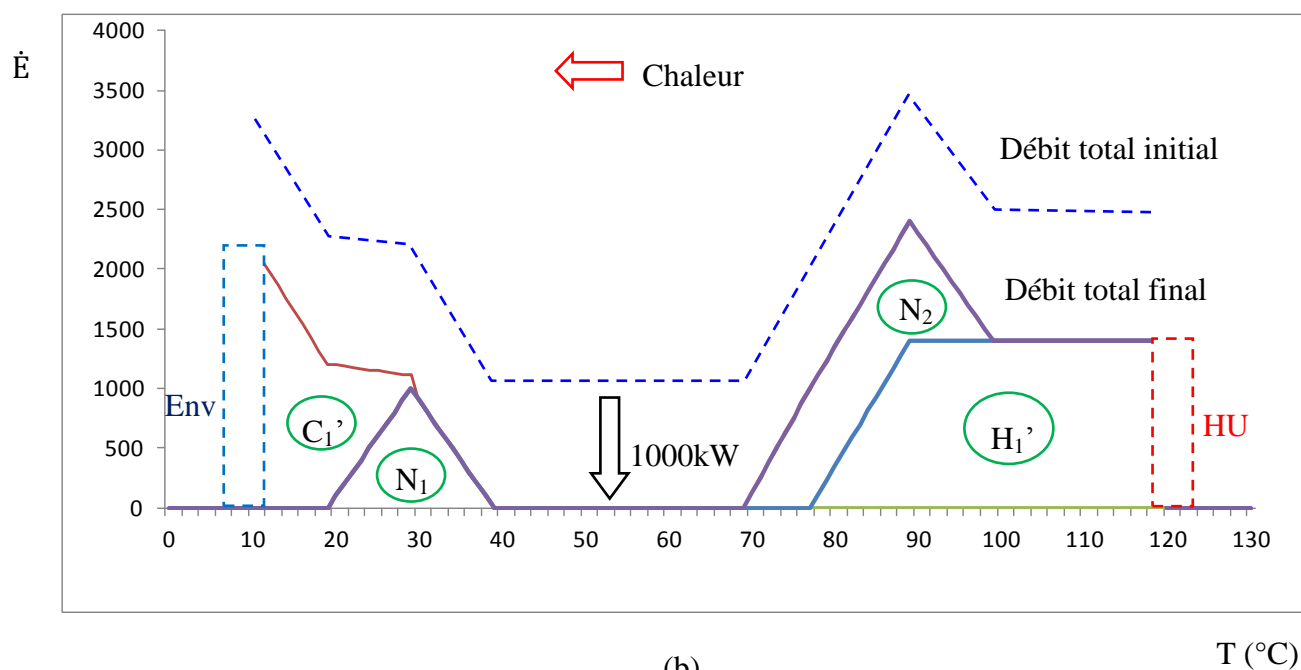


(b)

Figures 4-9 Exemple de réseau avant (a) et après (b) rétro-installation



(a)



(b)

Figure 4-10 Diagramme de transfert d'énergie avant (a) et après (b) rétro-installation

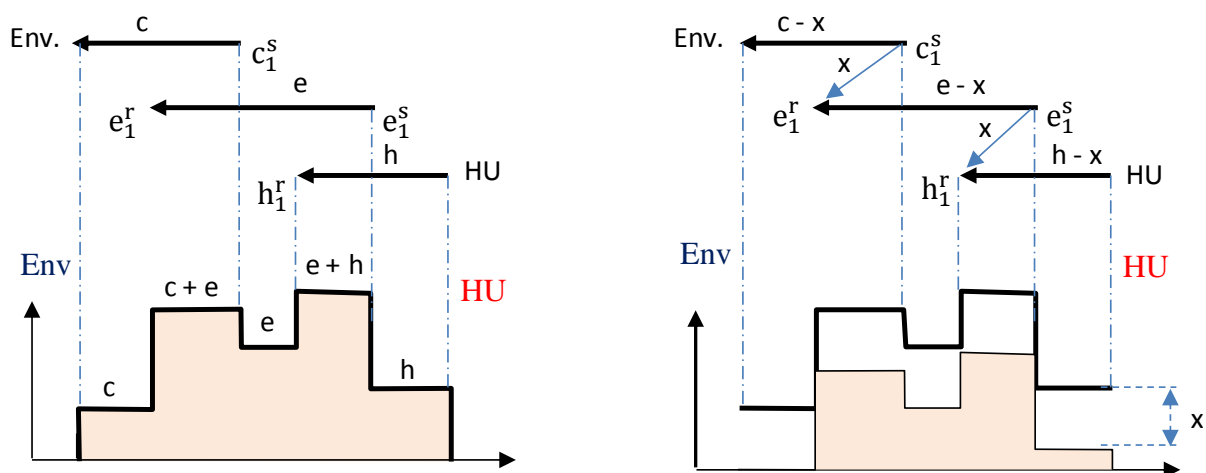


Figure 4-11 Explication de la réduction du débit par modifications pontales

Identification de modifications d'opération pour réduire la consommation d'énergie

Il est aussi possible de réduire la consommation d'énergie en modifiant des opérations de procédé. En fait la nécessité de modifications pontales pour réduire la consommation d'énergie est valable tant pour le réseau d'échangeurs que pour les opérations. Un pont peut être composé de modifications dans des échangeurs ou dans des opérations. La consommation minimale qui peut être atteinte avec des modifications dans le réseau, sans considérer les contraintes de connexion, est égale au maximum de la courbe globale d'opération (Figures 4-5). Cet extremum peut être modifié par des changements d'opération. La modification d'opération dont la courbe de transfert est non nulle à la température correspondant au maximum de la courbe d'opération a pour effet de modifier la consommation minimale. Ceci peut par exemple impliquer la suppression d'une perte de chaleur, la réduction de la dégradation de chaleur due à un mélange non-isotherme, ou le changement de la pression dans une colonne de distillation, comme montré à la Figure 4-12. Il est important de rappeler que des modifications dans le procédé peuvent avoir un effet positif sur les économies d'énergie seulement si celles-ci sont incluses dans un pont. Le diagramme, qui montre l'ensemble des dégradations causées par les opérations et échangeurs entre les utilités chaudes et l'environnement est un outil particulièrement puissant pour cette analyse.

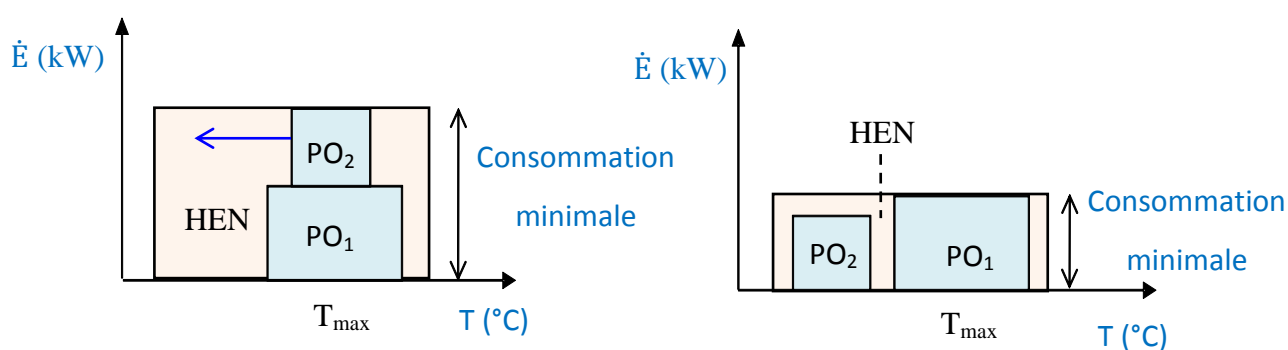


Figure 4-12 Réduction de la consommation minimale par modification de PO_2

Analyse énergétique globale du site industriel

Le diagramme peut être utilisé pour des applications qui vont bien au-delà de la rétro-installation des réseaux d'échangeurs. Le diagramme est très utile pour l'intégration énergétique en général, par exemple l'aménagement des chaudières et des turbines, le placement des utilités multiples, l'évaluation de la chaleur en excès théorique et directement disponible, l'identification d'opportunités d'insertion d'une pompe à chaleur, etc.

La chaleur, l'électricité et l'enthalpie chimique sont des formes usuelles d'énergie qui peuvent être converties sur un site industriel. Par exemple la vapeur à haute pression peut alimenter une turbine, produire de l'électricité et de la vapeur basse pression qui alimente le réseau d'échangeur de chaleur; cette chaleur peut ensuite être stockée en énergie chimique par réaction endothermique ou bien être dissipée à l'environnement (Figure 4-13). La conservation, dégradation et conversion de l'énergie peut être représentée sur le diagramme avec pour axe d'abscisse le ratio énergie-exergie. Cette figure montre la perte d'exergie dans la turbine, qui est égale à la perte correspondant à la détente de la vapeur moins le gain correspondant à la production d'électricité.

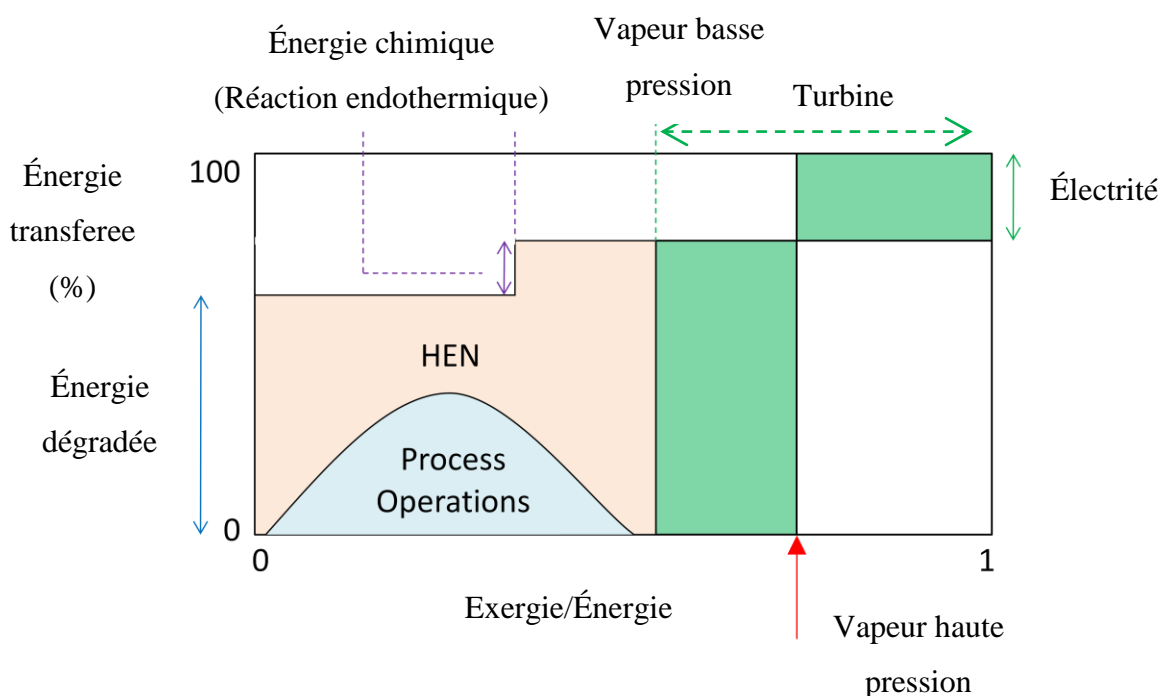


Figure 4-13 Diagramme de transfert d'énergie avec conversion d'énergie

Le mot « ex-ergie » est composé des racines grecques exprimant le travail qui peut être extrait d'un système dans son environnement. L'exergie B représente ainsi la quantité maximale de travail qui peut être obtenu d'un système; elle dépend de l'enthalpie H , l'entropie S et la température d'environnement T_e selon la relation suivante :

$$dB = dH - T_e * dS \quad (\text{Equation 5})$$

L'exergie thermique est nulle à la température d'environnement. L'équation 5 conduit au facteur de température proposé par Carnot après avoir remplacé l'entropie par l'expression exprimant sa dépendance avec la chaleur apportée au système et la température.

Remarques sur le diagramme de transfert d'énergie

Le diagramme pourrait aussi être nommé « diagramme de dégradation d'énergie » ou « diagramme de pont d'énergie ». Le diagramme est un outil puissant d'analyse énergétique de l'ensemble du site industriel, incluant le système d'utilités, les opérations de procédé, les pertes vers l'environnement et le réseau d'échangeurs. Il représente l'effet des deux premiers principes de la thermodynamique de conservation et dégradation d'énergie dans une usine et fait la synthèse entre deux grandes approches d'analyse énergétique : l'analyse de pincement et l'analyse exergetique. Il explique la présence du « pincement naturel » dans un procédé industriel, qui est la limite entre des zones excédentaire et déficitaire en chaleur causées par la dégradation d'énergie dans les opérations. Toute réduction de la consommation d'énergie nécessite un pont incluant des modifications dans le réseau d'échangeurs ou dans les opérations, et a pour effet de translater la courbe du total des transferts d'énergie vers le bas.

Les courbes de transfert d'énergie peuvent être organisées de plusieurs façons. Si les opérations de procédé sont considérées, nous suggérons de placer les courbes correspondant à celles-ci dans le bas. Les opérations peuvent ainsi être analysées indépendamment du réseau d'échangeurs. Par contre si seulement le réseau d'échangeurs de chaleur est considéré, il est suggéré de classer les courbes de transfert selon la température d'extrémité chaude du fournisseur décroissante. De la sorte les modifications pontales favorables (avec augmentation d'exergie) sont représentées par des flèches orientées vers le bas, tandis que les modifications qui mènent à de nouveaux échanges croisés (criss-cross match), qui sont défavorables mais parfois nécessaires pour réduire le coût d'investissement, sont représentées par des flèches orientées vers le haut.

Si seulement des modifications dans le réseau d'échangeur sont considérées, la capacité de réduction d'énergie évaluée sans tenir compte des contraintes de connexion est égale au minimum du débit d'énergie transférée entre les utilités chaudes et l'environnement au travers le réseau. La capacité de réduction évaluée en tenant compte d'une différence minimale de température spécifique entre chaque fournisseur et récepteur est égale au minimum du débit d'énergie transférée entre les utilités chaudes et l'environnement au travers le réseau après avoir soit translaté chaque fournisseur et récepteur sur l'abscisse selon sa contribution. Une autre façon de considérer les contraintes de différence minimale de température dans le diagramme est de les représenter par une couche supplémentaire autour de chaque opération de procédé (Figure 4.14). Les courbes de transfert des opérations de procédé sont ensuite additionnées et la valeur maximum de la somme indique la consommation minimale qui peut être atteinte par rétro-installation du réseau d'échangeurs avec respect des contraintes de différence minimale de température. L'ajout de couches représentant les contraintes de différence minimale de température se fait au détriment du réseau d'échangeurs. Dans la Figure 4-14, les surfaces correspondant au réchauffeur H et au refroidisseur C sont devenues plus petites, celle correspondant à l'opération de procédé PO est inchangée.

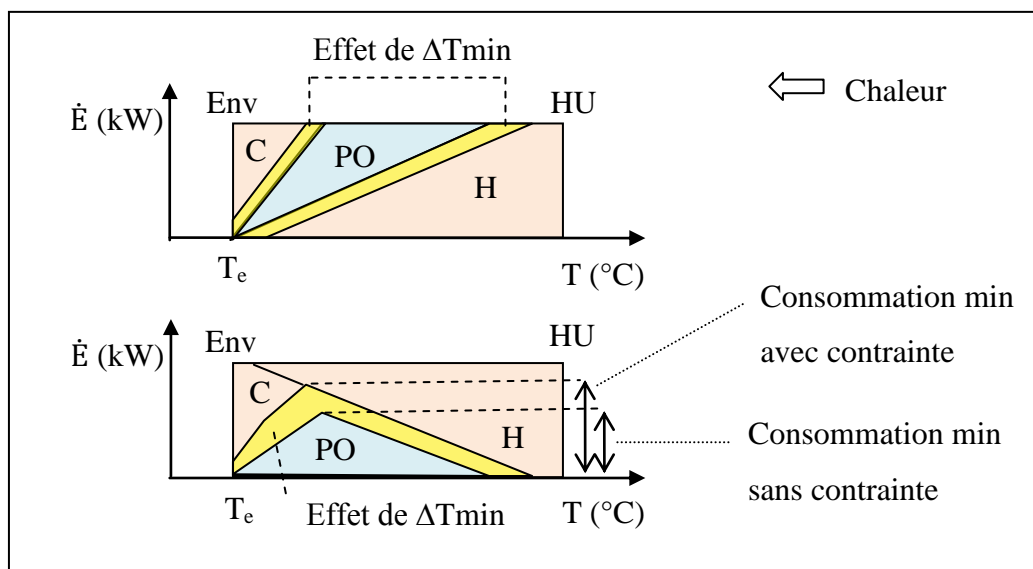


Figure 4-14 Évaluation du minimum de la consommation d'énergie avec contrainte

Il a été proposé d'évaluer la courbe de transfert d'énergie d'un système à partir de la différence entre les courbes d'enthalpie des sorties et des entrées, avec la température de l'environnement pour référence. Une autre façon d'évaluer la courbe de transfert d'un système consiste à calculer pour chaque entrée et sortie le débit de chaleur qui serait cascadée par un refroidissement hypothétique jusqu'à l'environnement. Le débit d'énergie transférée $\dot{E}(T)$ est égal à la différence entre la somme de chaleur cascadée des entrées et la somme de chaleur cascadée des sorties (équations 6 à 8).

$$\dot{E}(T) = \sum_i \dot{c}_i(T) - \sum_o \dot{c}_o(T) \quad \text{Pour } T \geq T_e \quad (\text{Equation 6})$$

$$\dot{c}_i(T) = \dot{m}_i * \frac{dH_i}{dT} \quad (\text{Équation 7})$$

$$\dot{c}_o(T) = \dot{m}_o * \frac{dH_o}{dT} \quad (\text{Équation 8})$$

Avec:

$\dot{E}(T)$: Débit d'énergie transférée à travers la température T , kW

$\dot{c}_i(T)$: Débit de chaleur cascadée de l'entrée i à travers la température T , kW

$\dot{c}_o(T)$: Débit de chaleur cascadée de la sortie o à travers la température T , kW

$H_i(T)$: Enthalpie massique de l'entrée i à la température T , kJ/kg

$H_o(T)$: Enthalpie massique de la sortie o à la température T , kJ/kg

\dot{m}_i : Débit massique de l'entrée i , kg/s

\dot{m}_o : Débit massique de la sortie o , kg/s

Notons finalement que le diagramme de transfert d'énergie d'un site industriel peut aussi être présenté par un carré de côté unitaire, avec le rapport Exergie/Énergie pour abscisse et la fraction de consommation d'énergie pour ordonnée. La surface de chaque système représente de la sorte sa fraction de perte d'exergie par rapport à l'ensemble du site industriel. Toutes les proportions de perte d'exergie dues à la chaudière, aux turbines, aux opérations de procédé, au réseau

d'échangeurs sont alors visibles; ceci permet de comparer plusieurs usines et d'obtenir un diagnostic rapide du système d'énergie et des opportunités d'amélioration, qui impliquent des modifications pontales, qui peuvent elles-aussi être identifiées.

Résumé sur le diagramme de transfert d'énergie

Le diagramme proposé est fondamental. Il représente l'effet des deux premiers principes de la thermodynamique de conservation et dégradation de l'énergie pour chaque opération de procédé et échangeur, et pour l'ensemble du site industriel. Le diagramme explique la présence naturelle d'une zone excédentaire et une zone déficitaire en chaleur dans un réseau d'échangeur de chaleur; elles sont dues à la dégradation de chaleur dans les opérations de procédé. La frontière entre ces zones est située au maximum de la courbe globale d'opération.

Si l'énergie thermique n'est pas convertie en une autre forme d'énergie, le débit de chaleur transféré est identique sur la gamme entière de température entre l'utilité chaude et l'environnement. Toute réduction de la consommation d'énergie implique de réduire ce débit sur tout cet intervalle. Ceci nécessite un pont. Tous les ponts sont visibles sur le diagramme.

Les informations disponibles sont les suivantes:

- Ensemble des modifications dans le réseau d'échangeurs menant à une réduction de la consommation d'énergie (pont composé de modifications dans le réseau seulement).
- Consommation minimum d'énergie par rétro-installation du réseau sans contraintes de connexion.
- Opérations de procédé à modifier afin de réduire la consommation d'énergie.
- Placement des utilités multiples, chaleur en excès disponible, opportunité d'insertion d'une pompe à chaleur.
- Perte d'exergie dans chaque opération et échangeur

4.2.9 Procédure de la méthode pontale pour la rétro-installation des réseaux d'échangeurs

Réduire la consommation d'énergie par rétro-installation du réseau implique de diminuer le débit de chaleur transféré des utilités chaudes vers l'environnement au travers des échangeurs. Les ponts sont les ensembles fondamentaux de modifications permettant de réduire la consommation d'énergie. Ces ensembles fondamentaux sont simplement énumérés. La procédure de la méthode pontale est présentée à la Figure 4-15. Les étapes 1,2 et 7 sont communes aux autres approches; les étapes 3 à 6 sont spécifiques à la méthode pontale.

La première étape est l'analyse du système d'énergie du site industriel en général afin de poser un diagnostic sur les avantages possibles d'une rétro-installation du réseau. Il est possible que la priorité soit l'amélioration d'une chaudière, l'installation d'une turbine de détente. Il est aussi possible que réduire la consommation de chaleur par rétro-installation du réseau ne soit pas avantageux du fait que les bénéfices provenant de la production d'électricité par une turbine soient importants. La seconde étape est l'extraction de données, qui inclut trois parties : l'identification et caractérisation des sources et demandes en chaleur du procédé; la description de la façon dont celles-ci sont gérées dans la situation présente; et la définition des contraintes spécifiques à chaque connexion, incluant la faisabilité pratique et la différence minimale autorisée de températures. Cette dernière peut être estimée par expérience ou à partir des coefficients de transfert de chaleur, du prix de la surface d'échange et de l'énergie. Un diagramme grille est souvent utilisé pour représenter le résultat des deux premières parties de l'extraction de données. Notons que l'utilisation d'une table, grâce à sa bi-dimensionnalité permettant de représenter chaque connexion, est très pratique pour afficher les résultats de l'ensemble de l'extraction de données. À l'étape 3 le diagramme de transfert d'énergie offre une vue globale sur les possibilités de réduction de la consommation d'énergie. À l'étape 4 la table de réseau est un outil pratique pour représenter l'ensemble des couples potentiels, caractériser les ponts et identifier la topologie finale du réseau. Cependant les étapes 3 et 4 ne sont pas obligatoires. L'étape 5 consiste à énumérer et caractériser les ponts. L'identification utilise trois filtres successifs : l'exclusion des couples inutiles; l'ajout de couples avec respect des conditions pontales; et l'exclusion des ponts inutiles de l'énumération. Seulement les couples qui peuvent être inclus dans des ponts premiers pertinents sont inclus dans l'ensemble des couples potentiels.

Les ponts composites sont identifiés par ajout d'un nombre minimal de couples à des ponts utiles; un pont résultant de l'ajout de couples est utile si sa capacité d'économie augmente strictement; l'ajout d'un nombre minimal de couples implique que l'enlèvement d'un ou plusieurs couples ajoutés a pour effet que l'ensemble ne respecte plus les conditions pontales. La caractérisation du pont inclut l'évaluation de la capacité d'économie, les modifications et nouvelles connexions, l'estimation de la surface d'échange nécessaire et la possibilité d'enlever des échangeurs. Cette caractérisation permet de sectionner les ponts intéressants. À l'étape 6, la topologie finale correspondant à un pont peut être identifiée par analyse d'ingénierie ou optimisation. Dans la seconde approche les variables de décision sont limitées à celles qui correspondent aux modifications pontales. Si l'approche optimisation est utilisée, la topologie du réseau peut aussi être identifiée directement à l'étape 5. À l'étape 7, la solution finale est sélectionnée selon les critères de rentabilité et opérabilité, tels que flexibilité, contrôlabilité, fiabilité, sécurité, et facilité pour le démarrage et arrêt de la production.

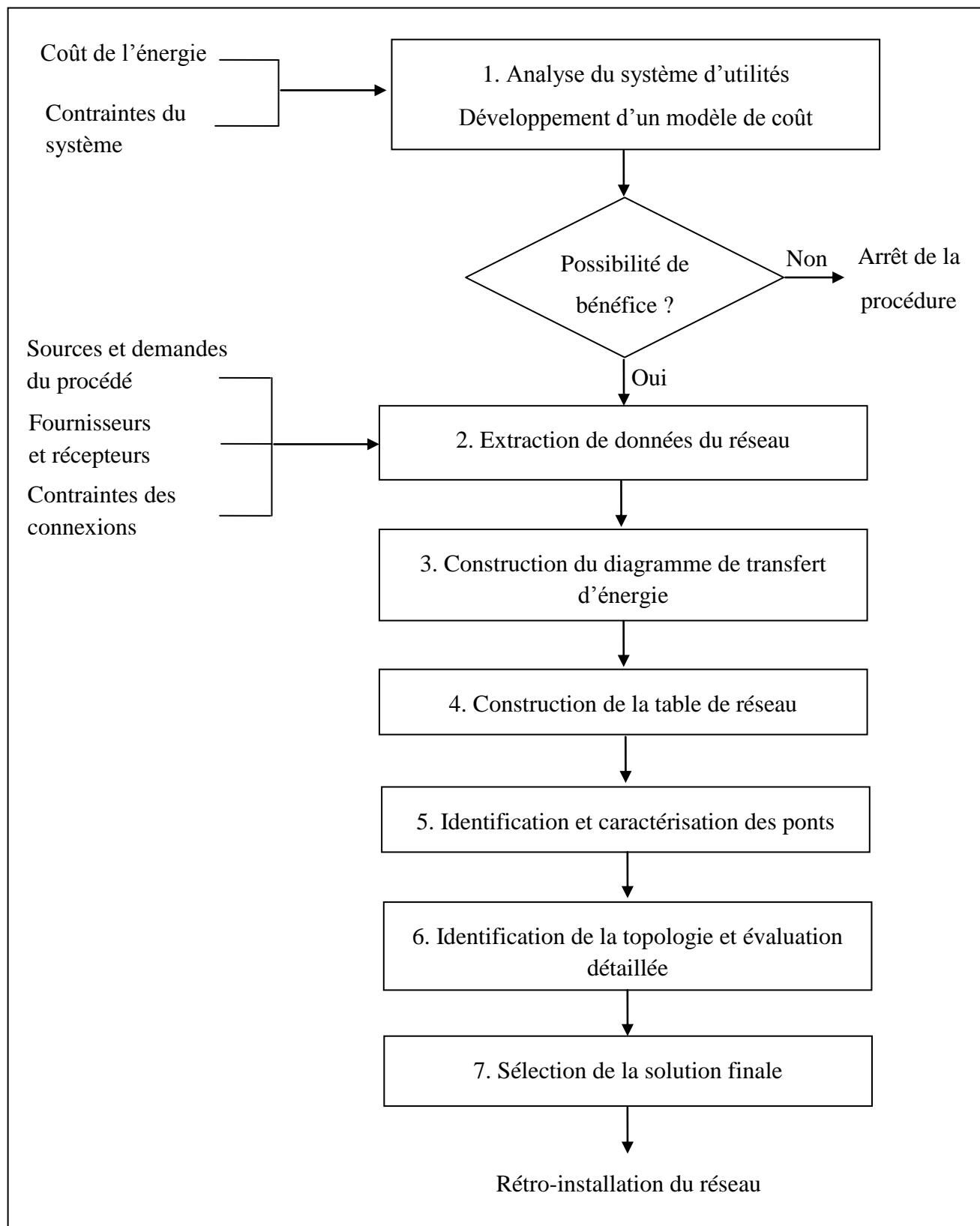


Figure 4-15 Procédure de la méthode pontale

4.2.10 Résumé

Les modifications fondamentales permettant de réduire consommation d'énergie ont été rendues explicites. Seulement un pont peut mener à une réduction de la consommation de chaleur. Ce retour à une description fondamentale permet d'énumérer toutes les possibilités de réduction du débit de chaleur entre les utilités chaudes et l'environnement. La méthode pontale a été développée pour l'intégration énergétique par rétro-installation et inclut les outils suivants :

- La définition stricte des ensembles de modifications nécessaires pour économiser l'énergie; ces ensembles sont nommés « ponts ».
- Une méthode pour énumérer les ponts.
- Une table de réseau afin de les évaluer facilement.
- Un diagramme de transfert d'énergie afin de visualiser les ponts.
- Des règles claires et explicites pour l'extraction de données, qui rendent possible l'analyse des réseaux incluant des échanges à contact direct et indirect.
- Une procédure globale pour la rétro-installation des réseaux d'échangeurs de chaleur.

CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE

L'analyse des modifications réduisant le débit de chaleur dégradée entre les utilités chaudes et l'environnement à travers les opérations de procédé et les échangeurs de chaleur existants a servi de base à une méthode d'intégration énergétique par rétro-installation. Le fait d'avoir rendu explicite le processus fondamental pour réduire la consommation d'énergie a permis le développement de la méthode pontale, qui présente l'avantage d'énumérer les modifications conduisant à des économies d'énergie. Cette partie présente la réduction de l'espace de recherche qui en résulte et une comparaison des forces et faiblesse de la méthode pontale.

5.1 Méthode d'énumération des ponts

Trois filtres qui réduisent le nombre d'opérations sont proposés pour l'énumération des ponts. Ils ont été décrits dans le chapitre 2. Le premier consiste à sélectionner l'ensemble des couples potentiels. Les couples qui ne peuvent pas être inclus dans un pont premier pertinent sont exclus. Les ponts premiers sont simplement listés. Un pont premier est considéré comme pertinent si sa capacité d'économie est significative et son coût d'investissement non prohibitif. L'ensemble des couples potentiels est obtenu par l'union des ponts premiers pertinents et forme par conséquent la structure pontale incluant le plus grand nombre de couples. Le second filtre consiste à identifier les ponts composites en ajoutant des couples à un pont de sorte que le résultat respecte les conditions pontales. Cette façon de construire de nouveaux ponts est plus efficace que celle que nous avons d'abord suivie et qui consistait à combiner des ponts premiers. Le troisième filtre consiste à exclure les ponts inutiles de l'énumération en ajoutant un nombre minimal de couples à des ponts utiles; l'ajout d'un nombre minimal de couples signifie que l'enlèvement d'un de ces couples a pour effet que l'ensemble ne respecte plus les conditions pontales; le pont qui résulte de l'ajout de couples est considéré comme utile si sa capacité d'économie augmente strictement.

Les effets du premier filtre sont ici évalués. Le nombre de combinaisons possibles de m couples parmi un ensemble incluant A couples, N_m^A , suit la relation suivante:

$$N_m^A = \frac{A!}{(A-m)!*m!} \quad \text{Équation 9}$$

Le nombre de nouveaux couples possibles au départ A est égal au nombre de fournisseurs multiplié par le nombre de récepteurs dans le réseau initial moins le nombre d'échangeurs existants. Le premier filtre réduit le nombre de couples A et donc le nombre de combinaisons possibles. Le Tableau 5.1 montre l'efficacité du premier filtre pour les trois exemples de l'article 'Bridge Analysis to reduce the heat consumption by HEN retrofit : Part2, Applications'. N_C désigne le nombre de refroidisseurs, N_E le nombre d'échangeurs internes, N_H le nombre de réchauffeurs, N_{HU} le nombre d'utilités chaudes, N_{CU} le nombre d'utilités froides.

Tableau 5.1 Effet du premier filtre seul

Exemple	N_C	N_E	N_H	N_{HU}	N_{CU}	m	Sans premier filtre		Avec premier filtre	
							A	N_m^A	A	N_m^A
1	1	2	1	1	1	1	11	11	6	6
						2		55		15
						3		165		20
						4		330		15
2	2	4	1	1	1	1	34	34	11	11
						2		561		55
						3		5 984		165
						4		46 376		330
3	1	9	5	1	1	1	149	149	15	15
						2		11 026		105
						3		540 274		455
						4		19 720 001		1365
						5		571 880 029		3003

Le tableau 5.2 montre l'efficacité du second filtre seul. Le nombre de combinaisons de couples est comparé au nombre de structures pontales impliquant m couples B_m pour différents réseaux initiaux.

Tableau 5.2 Effet du second filtre seul

N_C	N_E	N_H	N_{HU}	N_{CU}	A	m	N_m^A	B_m
1	2	1	1	1	11	3	165	4
2	2	2	1	1	18	3	816	52
2	3	2	1	1	28	3	3,276	88
2	4	2	1	1	40	4	91,390	701
3	5	3	1	1	69	4	864,501	6,606
5	15	5	1	1	415	6	6.8 E+12	8.7 E+06

Les effets combinés des premier et second filtres sont présentées dans le Table 5.3. Les exemples viennent de l'article référencé plus haut. Le nombre de combinaisons possibles N_m^A de m couples parmi un ensemble incluant A couples est beaucoup plus élevé que le nombre de structures pontales possibles B_m .

Tableau 5.3 Effet combiné des deux premiers filtres sur l'espace de recherche

Exemple	A	m	N_m^A	B_m
1	11	1	11	1
		2	55	2
		3	165	3
		4	330	4
2	34	1	34	0
		2	561	2
		3	5 984	6
		4	46 376	12
3	149	1	149	0
		2	11 026	2
		3	540 274	9
		4	19 720 001	20
		5	571 880 029	40

Le troisième filtre est surtout efficace pour les réseaux de grande taille. Il permet d'éviter l'énumération de ponts inutiles; un pont est considéré comme inutile si au moins un de ses sous-ensembles mène à une économie d'énergie identique. Rappelons que la capacité d'économie d'énergie ne diminue jamais par un ajout de couples à un pont. Cependant la capacité d'économie d'énergie augmente puis diminue au fur et à mesure que le nombre de couples augmente dans les ponts premiers car le transfert de chaleur au travers de ceux-ci est limité par la plus petite capacité d'échange des couples. Par définition un pont premier ne peut pas être décomposé en sous-ensembles respectant les conditions pontales.

5.2 Analyse des forces et faiblesses de la méthode pontale

La méthode pontale inclut les outils suivants:

- Le principe du pont, qui est un ensemble fondamental de couples fournisseur-récepteur permettant de réduire la consommation d'énergie
- Une méthode pour énumérer les ponts
- Un diagramme de transfert de chaleur pour visualiser les ponts
- Une table de réseau pour leur évaluation facile
- Une procédure pour la rétro-installation de réseau d'échangeurs de chaleur
- Une approche pour l'analyse énergétique globale du site industriel, incluant le système d'utilités, les opérations de procédé et le réseau d'échangeurs
- Une formulation pour identifier la topologie finale du réseau.

Le principe du pont comme ensemble de couples nécessaire pour réduire la consommation d'énergie est simple et important. Le fait de l'avoir rendu explicite offre des avantages majeurs. Les autres outils sont le résultat de développements ultérieurs basés sur ce principe. Celui-ci peut être utilisé dans des approches basées sur l'analyse (insight-based approaches) ou l'optimisation numérique. Ces dernières sont actuellement peu efficaces. La résolution d'un simple problème nécessite plusieurs heures de calcul, et cela sans même garantie d'optimalité [45]. L'utilisation du principe du pont réduit fortement l'espace de recherche. Les variables de décision sont limitées à celles impliquées dans les modifications pontales. Le principe du pont peut bien sûr être utilisé pour les échanges à contact indirect et les transferts directs de chaleur, mais il peut aussi inclure des modifications d'opération de procédé, et être généralisé pour la réduction de la consommation d'eau et d'autres ressources. Il est important de distinguer un pont d'un chemin (heater-cooler path); un chemin n'est pas nécessaire pour réduire la consommation d'énergie.

Les trois filtres proposés pour énumérer les ponts réduisent efficacement l'espace de recherche de solutions conduisant à des économies d'énergie.

Le diagramme de transfert d'énergie représente l'effet des deux principes de la thermodynamique dans les systèmes industriels. La chaleur est soit dégradée des utilités chaudes vers

l'environnement en passant au travers des opérations de procédé et échanges de chaleur, soit stockée en énergie chimique ou électrique. Le diagramme est un outil puissant pour l'analyse énergétique d'un site industriel.

La table de réseau a été développée dans le cadre de la recherche d'une méthode efficace pour énumérer les ponts. Les trois filtres qui facilitent leur énumération ont tous été conçus avec l'aide de la table. Par la suite l'utilisation de la table s'est révélée aussi pratique pour visualiser les contraintes de connexion, évaluer la capacité de réduction de la consommation d'énergie correspondant à un pont, estimer la surface d'échange et identifier la topologie finale du réseau. Sa bi-dimensionnalité convient naturellement à la représentation des échanges entre les sources et les demandes, ainsi que des couples fournisseur-récepteur.

Les aspects positifs principaux de l'approche pontale sont les suivants :

- Regard nouveau sur l'analyse énergétique
- Extraction de données explicite
- Espace de recherche de solutions réduit
- Intégration énergétique impliquant l'ensemble du site industriel, incluant le système d'utilités, les opérations de procédé et les échanges à contact direct et indirect.

L'énergie est conservée et dégradée progressivement vers l'environnement au travers des opérations de procédé et échangeurs. Réduire la consommation d'énergie nécessite de réduire le débit d'énergie transféré des utilités vers l'environnement; ceci implique un pont.

Le mécanisme fondamental de réduction de consommation d'énergie est explicité dans l'approche pontale, ce qui permet tout simplement d'énumérer les modifications possibles.

L'extraction de données dans l'approche pontale inclut trois parties : l'identification et la caractérisation des sources et demandes; l'identification et la caractérisation des fournisseurs et récepteurs; la définition des contraintes spécifiques à chaque connexion. L'extraction claire, simple et explicite a des conséquences positives sur le langage, la définition du problème et donc sa résolution. La possibilité de définir les contraintes spécifiques à chaque connexion rend facile l'utilisation de la méthode pontale pour analyser les réseaux incluant des échanges à contact direct et indirect. L'extraction de données pour ces deux types d'échange est simple et conforme au bon sens. Il en est différemment dans l'analyse de pincement. Un projet de réutilisation d'eau

pour satisfaire une demande en eau chaude qui permettrait de réduire la consommation de chaleur a pour effet de modifier la définition du problème car la réutilisation d'eau modifie les courbes composites. Á chaque groupe de projets de réutilisation d'eau correspondent un nouvel ensemble de données et de nouvelles courbes composites. Dans l'analyse pontale, un projet de réutilisation d'eau correspond à un échange à contact direct, et le problème défini au départ est inchangé.

L'analyse de pincement pour la rétro-installation de réseau d'échangeurs fournit deux informations principales : une cible de réduction de consommation d'énergie et une température de pincement au travers de laquelle les échanges devraient être supprimés. Voici quelques différences entre l'analyse de pincement et la méthode pontale :

- L'analyse de pincement n'explique pas la présence d'une zone excédentaire et une zone déficitaire en énergie dans un réseau. L'analyse pontale fournit cette explication.
- La cible de réduction de la consommation d'énergie évaluée par l'analyse de pincement ne peut pas être atteinte en pratique dans la plupart des cas car les contraintes de connexion, importantes en rétro-installation, ne sont pas considérées. Les contraintes de connexion sont explicites dans la méthode pontale.
- L'analyse de pincement ne donne aucune information sur l'ensemble des modifications nécessaires pour rééquilibrer le réseau après la suppression des échanges traversant la température de pincement. La méthode pontale décrit l'ensemble des modifications nécessaires pour réduire la consommation d'énergie.
- Il est possible de réduire la consommation d'énergie en ne supprimant aucun échange traversant le pincement ou bien en supprimant des échanges traversant une température autre que celle du pincement. Seulement un pont peut réduire la consommation d'énergie.
- L'analyse de pincement ne permet pas de traiter ensemble les échanges à contact direct et indirect, qui sont communs dans l'industrie papetière, et requiert une approche séquentielle inélégante. La méthode pontale analyse les deux types d'échange ensemble.

Une faiblesse de l'approche pontale pourrait être l'autre face d'un de ses aspects positifs. Comme seulement les ensembles de couples nécessaires pour réduire la consommation d'énergie sont identifiés, l'espace de recherche est fortement réduit, mais il y a aussi un risque de ne pas identifier certains réarrangements de réseau intéressants. En d'autres mots, la réduction de l'espace de recherche résultant de l'utilisation du principe pontal pourrait limiter l'identification de réallocation d'échangeurs conduisant à une réduction du coût d'investissement dans le réseau. Ces limites doivent encore être étudiées.

Seulement un pont peut réduire la consommation de chaleur dans un réseau d'échangeurs donné. Par bilan d'énergie, la réduction du débit d'énergie rejetée à l'environnement égale la réduction de consommation. La chaleur qui était rejetée à l'environnement doit être utilisée dans le réseau et ultimement au récepteur d'un réchauffeur. Si la chaleur qui était rejetée à l'environnement est utilisée pour un récepteur d'un échangeur interne, son fournisseur est libéré (partiellement ou totalement) et peut être utilisé pour un autre récepteur, et ainsi de suite jusqu'au récepteur d'un réchauffeur. Si la chaleur du fournisseur libéré d'un échangeur interne est rejetée à l'environnement, cette chaleur ne contribue pas à la réduction de la consommation d'énergie et l'ensemble de nouveaux couples ne satisfait pas aux conditions pontales. Par conséquent un pont est un ensemble de nouveaux couples fournisseur-récepteur nécessaire à la réduction de la consommation d'énergie dans un réseau donné.

Tout ensemble de modifications dans un réseau donné d'échangeurs peut être décomposé en maximum un pont, qui est responsable de la réduction de la consommation d'énergie, et maximum un ensemble de nouveaux couples correspondant à un réarrangement afin de réduire le coût d'investissement; ce dernier ensemble a pour caractéristique qu'aucun de ses sous-ensembles ne respecte les conditions pontales. Dans l'analyse pontale, d'abord les ponts sont identifiés et ensuite un réarrangement correspondant à chaque pont. Le réarrangement peut être identifié soit par analyse d'ingénierie soit par optimisation. La formulation pour l'optimisation est présentée dans l'annexe 5; le réarrangement est limité aux courants impliqués dans le pont.

CHAPITRE 6 CONCLUSIONS

Un procédé industriel, comme la Vie, est une « structure dissipative » selon la définition proposée par Ilya Prigogine : il capte l'énergie et la rejette dégradée dans son environnement; cette dégradation d'énergie rend possible la production au travers du procédé. L'intégration se retrouve dans la Nature; elle permet de réduire l'augmentation de l'entropie, les pertes de ressources. Toute réduction de consommation d'énergie implique de réduire le débit d'énergie rejetée par un système vers son environnement, où la dégradation est maximale.

6.1 Contributions à l'ensemble des connaissances

Une méthode systématique et pratique d'intégration énergétique basée sur les deux premiers principes de la thermodynamique a été développée pour la rétro-installation des usines. Cette méthode comble les lacunes identifiées à la suite de la revue de la littérature, lacunes qui ont mené à cette voie de recherche.

La méthode est basée sur l'identification des modifications qui réduisent le débit de chaleur dégradée entre les utilités chaudes et l'environnement au travers des échangeurs de chaleurs existants et opérations de procédé. Elle a dans un premier temps été conçue pour la rétro-installation des réseaux d'échangeurs de chaleur à contact indirect. Elle a ensuite été étendue aux échanges à contact direct, qui sont importants dans les usines papetières. Finalement le diagramme de transfert d'énergie a été développé afin de visualiser les principes de conservation et dégradation de l'énergie dans l'industrie; il offre un regard nouveau et facilite l'intégration énergétique du réseau d'échangeurs de chaleur, des opérations de procédé et du système d'utilités par synthèse ou rétro-installation. La méthode a été appliquée et validée avec des études de cas, incluant le procédé de pâte kraft et un procédé de bioraffinage.

La méthode pontale inclut les outils suivants :

- La description du processus fondamental permettant de réduire la consommation d'énergie, qui est rendu explicite et implique un « pont ».
- Une table de réseau pour l'identification et l'évaluation faciles des ponts

- Une procédure efficace pour énumérer les ponts
- Un diagramme de transfert d'énergie pour visualiser l'ensemble des possibilités d'intégration d'un procédé industriel par synthèse ou rétro-installation
- Une procédure générale pour la rétro-installation des réseaux d'échangeurs de chaleur

6.2 Recommandations pour travaux futurs

- L'algorithme d'identification et évaluation des ponts peut être inclus dans un logiciel. L'approche d'optimisation numérique peut être utilisée pour identifier la topologie du réseau d'échangeurs de chaleur résultant de modifications pontales.
- La méthode pontale peut être appliquée et testée pour l'intégration de systèmes traversés par plusieurs formes d'énergie. Le rapport exergie/énergie peut remplacer la température afin de représenter la dégradation en général. Ceci permettrait par exemple d'analyser la production d'électricité dans une turbine et son intégration dans un site industriel.
- Le principe pontal peut être utilisé pour améliorer d'autres approches d'intégration énergétique basées sur l'analyse de procédé ou sur l'optimisation. Les principes de la méthode pontale peuvent être adaptés pour l'intégration massique. Ils pourraient être étendus afin d'analyser d'autres systèmes traversés par des flux respectant les principes de conservation et dégradation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] T. Umeda, J. Itoh and K. Shiroko, Heat Exchnage System Synthesis, Chemical Engineering Progress, 70-76 (1978)
- [2] J.R. Flower and B. Linnhof, A Thermodynamic-Combinatorial Approach to the Design of optimum Heat Exchnager Networks, AIChE Journal, 26(1): 1-9 (1980)
- [3] J.R. Flower and B. Linnhof, Thermodynamic Analysis in the Design of Process Networks, Computers & Chemical Enginnering, 3: 283-291 (1979)
- [4] D. Boland and B. Linnhof, The Preliminary Design of Networks for Heat Exchange by Systematic Methods, The Chemical Engineer, p9-15 (1979)
- [5] B. Linnhof and J.A. Turner, Simple Concepts in Process Synthesis Give Energy Savings and Elegant Designs, The Chemical Engineer, p621-633 (1980)
- [6] B. Linnhof and J.A. Turner, Heat-Recovery networks: new insights yield big saving, Chemical Engineering, p56-70 (1981)
- [7] B. Linnhof and E. Hindmarsh, The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks, *Understanding Process Integration*, Lancaster (1982)
- [8] B. Linnhof, D.R. Mason and I. Wardle, Understanding heat exchanger networks, Computers and Chemical Engineering, 3(1-4): p. 295-302 (1979)
- [9] J.E. Hendry, D.F. Rudd and J.D. Saeder, Synthesis in the design of Chemical Processes, AIChE Journal, 19: p1-15 (1973)
- [10] Marechal, F., Kalitventzeff, B., Energy integration of industrial sites: tools, methodology and application, Applied Thermal Engineering 18, 921-933 (1998)
- [11] Klemes, J., Friedler, F., Bulatov, I., Varbanov, P., Sustainability in the Process Industries: Integration and Optimizaton, McGraw-Hill, New York (2011)

- [12] Tjoe, T.N., Linnhof, B., Using pinch technology for process retrofit, *Chemical Engineering* 93, 47-60 (1986)
- [13] Linnhof, B., Ahmad, S., "Cost optimum heat exchanger networks, Part 1: minimum energy and capital using simple models for capital costs", *Computers & Chemical Engineering* 14 (1990) 729-750.
- [14] Linnhof March, Introduction to Pinch Technology, Linnhof March, UL (1998).
- [15] Kemp, I.C., Pinch Analysis and Process Integration: A User's Guide to Process Integration for the Efficient Use of Energy, Butterworth-Heinemann Oxford (2007).
- [16] Linnhof, B., Hindmarsh, E., "The pinch design method for heat exchanger networks", *Chemical Engineering Science* (1983) 745-763.
- [17] B Linnhof and T.N. Tjoe, Pinch technology retrofit: Setting targets for existing plant, AIChE National Meeting, Houston, TX (1985)
- [18] B. Linnhof, Pinch Analysis - A State-Of-The-Art Overview, *Chemical Engineering Research and Design*, 71(A5), p503-522 (1993)
- [19] Townsend, D.W., Linnhof, B., "Surface area targets for heat exchanger networks", Proc. of the IChemE Annual Research Meeting, Bath, April 1984.
- [20] A. Carlsson, Optimum Design of Heat Exchnager Networks in Retrofit Situations, PhD thesis, Chalmers, Univerity of Technology, Gothenburg (1996)
- [21] Carlsson, A., Franck, P., Berntsson, T., Design better heat exchanger network retrofits, *Chemical Engineering Progress* 89, 87-96 (1993).
- [22] X.X. Zhu and X.R. Nie, Pressure drop considerations for heat exchanger network grassrrots design, *Computers & Chemical Engineering*, 26 (12): p1661-1676 (2002)
- [23] G.T. Polley and D. Green, Perry's chemical enginners'handbook 7th edition, The McGraw-Hill Companies, Inc (1997)
- [24] G.T. Polley and M.H. Panjeh Shahi, and F.O. Jegede, Pressure-Drop Considerations in the Retrofit of Heat-Exchnager Networks, *Chemical Engineering Research and Design*, 78(A2): p161-167 (2000)

- [25] F.O. Jegede and G.T. Polley, Optimum heat exchanger design, *Chemical Engineering Research & Design*, 70(2): p.133-141 (1992)
- [26] G.T. Polley, Selecting stream splits in heat-exchanger network design, *Heat Recovery Systems and CHP*, 15(1): p.85-94 (1995)
- [27] S.G. Hall, A. Ahmad and R. Smith, Capital cost Targets for Heat-Exchanger Networks Comprising Mixed Materials of Construction, Pressure Ratings and Exchanger Types, *Computers and Chemical Engineering*, 14(3): p. 319-335 (1990)
- [28] van Reisen, J.L.B., Grievink, J., Polley, G.T., Verheijen, P.J.T., The placement of two-stream and multi-stream heat exchangers in an existing network through path analysis, *Comput. Chem. Engineering* 19, S143-S148 (1995)
- [29] van Reisen, J.L.B., Polley, G.T., Verheijen, P.J.T., Structural targeting for heat integration retrofit, *Applied Thermal Engineering*, 18(5): p. 283-294 (1998).
- [30] Asante, N.D.K., Zhu, X.X., An automated and interactive approach for heat exchanger network retrofit, *Transactions, Institute of Chemical Engineers* 75, 349–360 (1997)
- [31] Osman, A., Mutalib, M.I.A., Shuhaimi, M., Amminudin, K.A., Path combinations for HEN retrofit, *Applied Thermal Engineering* 29, 3103-3109 (2009).
- [32] Zhu, X.X., Asante, N.D.K., Diagnosis and optimization approach for heat exchanger network retrofit, *AIChE J.* 45, 1488-1503 (1999).
- [33] Varbanov, P.S., Klemes, J., Rules for path construction for HEN debottlenecking, *Applied Thermal Engineering* 20, 1409-1420 (2000).
- [34] Bakhtiari, B., Bedard, S., Retrofitting heat exchanger networks using a modified network pinch approach, *Applied Thermal Engineering*, 51 (2013) 973-979
- [35] Ciric, A.R., Floudas, C.A., A retrofit approach for heat exchanger networks, *Computers and Chemical Engineering* 13, 703-715 (1989).
- [36] Ciric, A.R., Floudas, C.A., A mixed integer nonlinear programming model for retrofitting heat exchanger networks, *Ind. Eng. Chem. Res.* 29, 239-251 (1990).
- [37] Yee, T.F., Grossmann, I.E., A screening optimization approach for the retrofit of heat exchanger networks, *Ind. Eng. Chem. Res.* 30, 146-162 (1991).

- [38] M.M. Daichendt and Grossmann, A Preliminary Screening Procedure for MINLP Heat-Exchanger Network Synthesis Using Aggregated Models, *Chemical Engineering Research and Design*, 72(A5): p. 708-709 (1994)
- [39] M.M. Daichendt and Grossmann, Preliminary Screening Procedure for the MINLP Synthesis of process systems - II. Heat exchanger networks, Using Aggregated Models, *Computers & Chemical Engineering*, 18(8): p. 679-709 (1994)
- [40] Furman, K.C., Sahinidis, N.V., Computational complexity of heat exchanger network synthesis, *Comp. Chem. Eng.* 25, 1371–1390 (2001).
- [41] Athier, G., Floquet, P., Pibouleau, L., Domenech, S. (1998). A mixed method for retrofitting heat exchanger networks, *Comp. Chem. Eng.* 22, 505-511 (1998).
- [42] Bochenek, R., Jezowski, J.M., Genetic algorithm approach for retrofitting heat exchanger network with standard heat exchangers. In 16th European Symposium on Computer-Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems
- [43] Jezowski, J.M., Bochenek, R., Poplewski, G. (2007). On application of stochastic optimization techniques to designing heat exchanger and water networks, *Chem. Eng. Proc.*, article in press.
- [44] Rezaei, E., Shafiei, S., Heat exchanger network retrofit by coupling genetic algorithm with NLP and ILP methods, *Computers and Chemical Engineering* 33, 1451-1459 (2009).
- [45] Barbaro, A., Bagajewicz, M. J., New rigorous one-step MILP formulation for heat exchanger network synthesis, *Computers and Chemical Engineering* 29 (2005) 1945–1976.
- [46] Barbaro, A., Nguyen, D., Viparunat, N., Bagajewicz, M. J., All-at-one and step-wise detailed retrofit of heat exchanger networks using an MILP model
- [47] J. Calloway, H. Cripps and T. Retsina, Pinch technology in practical kraft mill optimization, *Engineering Conference*, TAPPI Press, Seattle, USA (1990)
- [48] H. Cripps, R. Capell, A. Melton and T. Retsina: Pinch Integration Achieves Minimum Energy Evaporation Capacity, *Tappi Engineering Conference*, Atlanta, USA, (1996)

- [49] G. Noel, G. Boisvert, Project design in energy efficiency using Pinch analysis shows its use at an Abitibi-Consolidated mill in Beupre, Quebec, Pulp and paper Canada, 99(12) 103-105 (1998)
- [50] J. Stromberg, N. Berglin, T. Berntsson, Using process integration to approach the minimum impact pulp mill, TAPPI Environmental Conference and Exhibit, TAPPI Press (1997)
- [51] “Energy efficient water utilization systems in process plants”, Bagajewicz, M., Rodera, H., Savelski, M., Comput. Chem. Eng., 26 (2002), 59-79
- [52] E. Axelsson and T. Berntsson, Pinch analyses of a model mill: Economic and environmental gains from thermal process-integration in a state-of-the-art magazine paper mill, Nord. Pulp Paper Res. J. (20)3, 308-315, (2005)
- [53] C. Bengtsson, Novel Process Integration Opportunities in Existing Kraft Pulp Mills with Low Water Consumption, PhD thesis, Department of Heat and Power Technology, Chalmers, University of Technology, Gothenburg (2004)
- [54] B. Rydberg, J. Collins, P. Nakanishi and A. Ahlen, Results of energy reduction program at Marathon Pulp, 89th Annual meeting, Montreal, QC, Canada, session 1B-2, 4pp, (2003)
- [55] M. Towers, Energy reduction at a kraft mill: Examining the effects of process integration, benchmarking, and water reduction, Tappi, 4(3), 15-21 (2005)
- [56] P Persson, J. and Berntsson, T. (2010), Influence of short-term variations on energy-savings opportunities in a pulp mill, Journal of Cleaner Production 18, 935–943.
- [57] “Direct and Indirect Heat Transfer in Water Network System”, Savulescu, L., Sorin, M., Smith, R., Applied Thermal Engineering 22 (2002), 981-988
- [58] “The potential for energy savings when reducing the water consumption in a kraft pulp mill”, Wising, U., Berntsson, T., Stuart, P.R., Appl. Therm. Eng., 25 (2005) 1057-1066
- [59] U. Wising, Process Integration in Model Kraft Pulp Mills: Technical, Economic and Environmental Implications, PhD thesis, Department of Chemical Engineering and Environmental Science, Chalmers, University of Technology, Gothenburg (2005)

- [60] E. Wallin, Process Integration of Industrial Heat Pumps in Grass-root and Retrofit Situations, PhD thesis, Chalmers, University of Technology, Gothenburg (1996)
- [61] IEA, Industrial heat pumps: Experiences, potential and global environmental benefits, IEA Report No. HPP-AN21-1 (ISBN 90-73741-14-9)
- [62] Nordman, R., Berntsson, T., Design of Kraft pulp mill hot water system—A new method that maximizes excess heat, *Applied Thermal Engineering* 26, 363 (2006).
- [63] Roadmap to minimum energy and water use for integrated newsprint mills, Lafourcade, S., Fairbank, M.; Stuart, P., Annual Meeting of the Pulp and Paper Technical Association of Canada (PAPTAC), v A, p A63-A69, 2006, PAPTAC 92nd Annual Meeting Preprints 2006.
- [64] Thermal pinch analysis with process streams mixing at a TMP-newsprint mill, Lafourcade, S., Labidi, J., Koteles, R., Gélinas, C., Stuart, P., *Pulp and Paper Canada*, v 104, n 12, p 74-77, December 2003
- [65] “A process integration-based decision support system for the identification of water and energy efficiency improvements in the pulp and paper industry”, Alva-Argaez, A., Savulescu, L., Poulin, B., Paptac 93rd Annual meeting 2007
- [66] “Water and Energy savings at a Kraft Paperboard Mill Using Process Integration”, Savulescu, L., Poulin, B., Hamache, A., Bedard, S., Gennaoui, S., *Pulp and Paper Canada*, 106: 9 (2005) 29-31
- [67] “Direct heat transfer considerations for improving energy efficiency in pulp and paper Kraft mills”, Savulescu, L.E., and Alva-Argaez, A., *Energy*, 33: 1562-1571 (2008)
- [68] “Base case process development for energy efficiency improvement, application to a Kraft pulp mill, Part I: definition and characterization”, Mateos-Espejel, E., Savulescu, L., Paris, J., *Chem. Eng. Res. Des.* 89 (2011) 729-741
- [69] “Base case process development for energy efficiency improvement, application to a Kraft pulp mill, Part II: benchmarking analysis”, Mateos-Espejel, E., Savulescu, L., Paris, J., *Chem. Eng. Res. Des.* 89 (2011) 742-752
- [70] M. Sorin and J. Paris, Integrated exergy load distribution method and pinch analysis, *Computers & Chemical Engineering*, 23(4-5): p. 497-507 (1999)

- [71] F. Stain and D. Favrat, Energy integration of industrial processes based on the pinch analysis method extended to include exergy factors, *Applied Thermal Engineering*, 16(6): p. 497-507
- [72] “Energy and Water Pinch study at Parenco Paper mill”, Schaareman, M., Verstraeten, E., Blaak, R., Hoolmeijer, A., Chester, I., *Paper Technology* (2000)
- [73] Mateos-Espejel E., Savulescu L., Marechal F., Paris J., Unified methodology for thermal energy efficiency improvement: application to Kraft process, *Chemical Engineering Science* 66, 135-151, 2011.
- [74] “Improving energy recovery for water minimization”, Leewongtanawit, B., Kim, J., *Energy*, 34, (2009), 880-893
- [75] “Studies on simultaneous energy and water minimization, part II: systems with maximum re-use”, Savulescu, L., Kim, J., Smith, R., *Chem. Eng. Sci.*, 60 (2005), 3291-3308
- [76] El Halwagi, M.M., Solve design puzzles with mass integration, *Chemical engineering progress*, 1998, v: 94, no 8: 25-44
- [77] D.C.Y. Foo, Z.A. Manan, Y.L. Tan, Use cascade analysis to optimize water networks, *Chem. Eng. Prog.* 102(7): 45-52 (2006)
- [78] D.C.Y. Foo, Water Cascade analysis for single and multiple impure fresh water feed, *Trans. IChemE (Part A)* 85 (A8) 1169-1177 (2007)
- [79] D.C.Y. Foo, Flowrate targeting for threshold problems and plant-wide integration for water network synthesis, *J. Environ. Manage.*, 88(2) 253-274 (2008)
- [80] D.K.S. Ng, D.C.Y. Foo, Y.L. Tan, R.R. Tan, Ultimate flowrate targeting with regeneration placement, *Trans. IChemE (Part A)* 1253-1267 (2007)
- [81] Savulescu, L., Simultaneous energy and water minimization, *Ph.D. Thesis*, UMIST, Manchester, 1999.
- [82] “Wastewater minimization”, Wang, Y.P., and Smith, R., *Chem. Eng., Sci.* 49 (7): 981-1006 (1994)
- [83] “Pollution prevention through process integration Systematic tools”, El-Halwagi, M.M., 1st ed., San Diego, California: Academic Press (1997)

- [84] El Halwagi, M. M., A.A. Hamad, and G.W. Garrison, Synthesis of waste Interception and Allocation Networks, *AIChE J.*, 42 (11), pp 3087-3101 (1996)
- [85] “Studies on simultaneous energy and water minimization, part I: systems with no water re-use”, Savulescu, L., Kim, J., Smith, R., *Chem. Eng. Sci.*, 60 (2005), 3279-3290
- [86] Savulescu, L., Simultaneous energy and water minimization, *Ph.D. Thesis*, UMIST, Manchester, 1999.
- [87] Nordman, R., Berntsson, T., Use of advanced composite curves for assessing cost-effective HEN retrofit: I: Theory and concepts, *Applied Thermal Engineering* 29, 275-291 (2009).
- [88] Lakshmanan, R., and R. Banares-Alcantara, A novel visualization tool for heat exchanger network retrofit. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1996. 35: p 4507-4522
- [89] Lakshmanan, R., and R. Banares-Alcantara, Retrofit by inspection using thermodynamic process visualization. *Computers & Chemical Engineering*, 1998. 22: S809-S812
- [90] T.J. Kotas, Exergy method of thermal and chemical plant analysis, *Chem. Eng. Res. Des.*, 64: p.212-229 (1986)
- [91] Piacentino, A., “Thermal analysis and new insights to support decision making in retrofit and relaxation of heat exchanger networks”, *Applied Thermal Engineering*, 31 (2011) 3479-3499.
- [92] Linnhoh, B., Townsend, D.W., Boland, D., *A User Guide to Process Integration for the Efficient Use of Energy*, 1st ed., Institute of Chemical Engineers (1982).
- [93] Axelsson, E., Olsson, M.R., Berntsson, T., Heat integration opportunities in average Scandinavian Kraft pulp mills: Pinch analyses of model mills, *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 21(4), 466-475 (2006).
- [94] J. Alghehed, Energy Efficient Evaporation in Future Kraft Pulp Mills, PhD thesis, Department of Heat and Power Technology, Chalmers, University of Technology, Gothenburg (2002)
- [95] E. Axelsson, M.R. Olsson and T. Berntsson: Increased capacity in kraft pulp mills: Lignin separation combined with reduced steam demand compared with recovery boiler upgrade, *Nord. Pulp Paper Res. J.* (21)4, 485-492, (2006)

- [96] M.R. Olsson, E. Axelsson and T. Berntsson, Exporting lignin or power from heat integrated kraft pulp mills: A techno-economic comparison using model mills, *Nord. Pulp Paper Res. J.* (21)4, 476-484, (2006)
- [97] Ruhonen, P., Ahtila, P., "Analysis of a mechanical pulp and paper mill using advanced composite curves", *Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 649-657.
- [98] C. Bengtsson, R. Nordman and T. Berntsson, utilization of excess heat in the pulp and paper industry - a case study of technical and economic opportunities, *Applied Thermal Engineering*, 22(9): 1069-1081 (2002)
- [99] R. Nordman, New process integration methods for heat-saving retrofit in industrial systems, PhD thesis, Department of Heat and Power Technology, Chalmers, University of Technology, Gothenburg (2005)
- [100] T. Gundersen and I.E. Grossmann, Improved Optimization Strategies for automated heat exchanger network synthesis through physical insights, *Computers & Chemical Engineering*, 14(9): p925-944 (1990)
- [101] T.B. Challand, R.W. Colbert and C.K. Venkatesh, Computerized Heat Exchanger Networks, *Chemical Engineering Progress*, p. 65-71 (1981)
- [102] R.W. Colbert, Industrial Heat Exchanger Networks, *Chemical Engineering Progress*, p. 47-54 (1982)
- [103] K.K. Trivedi, Systematic energy relaxation in MER heat exchanger networks, *Computers and Chemical Engineering*, 14(6): p601-611 (1990)
- [104] K.K. Trivedi, A new dual-temperature design method for the synthesis of heat exchanger networks, *Computers and Chemical Engineering*, 13(6): p667-685 (1989)
- [105] Nordman, R., Berntsson, T., Use of advanced composite curves for assessing cost-effective HEN retrofit: II: Case Studies, *Applied Thermal Engineering* 29, 292-291 (2009).
- [106] Serth, R.W., *Process Heat Transfer - Principles and applications*, Academic Press -Imprint of Elsevier, Oxford (2007).

- [107] Smith, R., Chemical Process—Design and Integration, McGraw-Hill, New York (2005).
- [108] Smith, R., Jobson, M., Chen, L., Recent development in the retrofit of heat exchanger networks, *Applied Thermal Engineering*, 30, 2281-2289 (2010).
- [109] J. Cerda, Minimum utility usage in heat exchanger network synthesis: A transportation problem, *Chemical Engineering Science*, 38(3): p. 373-387 (1983)
- [110] J. Cerda, and W. Westerburg, Synthesizing heat exchanger networks having restricted stream/stream matches using transportation problem formulations, *Chemical Engineering Science*, 38(3): p. 1723-1740 (1983)
- [111] Pettersson, F., Synthesis of large-scale heat exchanger networks using a sequential match reduction approach, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 29, Issue 5, 15 April 2005, Pages 993–1007

ANNEXES

- Annexe 1: Article - Bridge Analysis to Reduce the Industrial Energy Requirements by Heat Exchanger Network Retrofit: Part 1 - Concepts
- Annexe 2: Article - Bridge Analysis to Reduce the Industrial Energy Requirements by Heat Exchanger Network Retrofit: Part 2 - Applications
- Annexe 3: Article - Application of Bridge Analysis to Retrofitting Direct- and Indirect-Contact Exchange networks
- Annexe 4: Article - Energy Transfer Diagram for improving integration of industrial systems
- Annexe 5: Rapport - Formulation pour identifier la topologie du réseau résultant de modifications pontales

ANNEXE 1

Article

Titre: Bridge Analysis to Reduce the Industrial Energy Requirements by Heat Exchanger
Network Retrofit: Part 1 – Concepts

Auteurs : J.-C. Bonhivers, S. Bala et P. R. Stuart

Journal : soumis à *Energy*.

Bridge Analysis to Reduce the Industrial Energy Requirements by Heat-Exchanger Network Retrofit: Part 1 - Concepts

Jean-Christophe Bonhivers, Balasubrahmanyam Srinivasan, Paul R. Stuart^a

^a NSERC Chair in Design Engineering, Department of Chemical Engineering, Ecole Polytechnique de Montreal, P.O. Box 6079, Station Centre-Ville, Montreal, Quebec H3C 3A7, CANADA
E-mail: paul.stuart@polymtl.ca

Abstract

Energy savings in existing plants usually have positive economic and environmental impacts. Mathematical approaches to heat-exchanger network (HEN) retrofit are usually complex and do not guarantee identification of the global optimum. Thanks to its simplicity the pinch-based approach is widely used, even though difficulties for its adaption to HEN retrofit are encountered. The energy supplied is degraded throughout the industrial process. Reducing heat consumption implies a reduction in the flow rate of heat transferred from the heating utility through the existing heat exchanger network until rejected to the environment. This progressive transfer of heat in the existing heat exchanges from the heating utility to the environment is not explicitly analyzed in the present approaches for HEN retrofit. This paper presents the concepts supporting a method for HEN retrofit. The fundamental set of modifications necessary to reduce the heat consumption is made explicit and is represented by a “bridge”. A method to enumerate the bridges is described. A heat transfer diagram to identify bridges is also presented. Finally a network table to easily identify and evaluate bridges is proposed. A global procedure for HEN retrofit and case studies are presented in a second paper.

Key words: energy integration, retrofit, heat exchanger, network

1. Introduction

1.1. Problem context

The manufacturing process industries are large energy users. Energy analysis methods for new and existing plants have been developed in last decades to increase their profitability and reduce the environmental impacts of their activities. Energy analysis can involve the following areas in a plant: (1) the utilities which include the production of heat and electricity, and the cooling, (2) the heat exchanger network (HEN), and (3) the process operations. This paper presents concepts to reduce the heat consumption by HEN retrofit. However these concepts can also be applied for energy analysis of utilities and process operations in new or existing plants.

1.2. Literature review about HEN retrofit methods

Heat integration, since its development in the late 1970s, has demonstrated large energy reductions across numerous industry sectors. The different approaches used in heat integration can be broadly classified as either (i) insight-based methods or (ii) optimization-based methods. Insight-based methods use graphical tools such as composite curves to calculate energy targets and heuristics for network design to achieve these targets [1-5]. The main advantages of these methods are their simplicity, their graphical representation of the problem, and the involvement of the designer throughout the steps. Optimization-based methods use mathematical programming to minimize or maximize an objective function such as cost or profit with respect to constraints such as energy balances and heat-exchange models. However, optimization approaches for retrofitting heat-exchanger networks are complex and do not guarantee identification of the global optimum. Pinch-based approaches, which do not guarantee to find the global optimum either, are widely used for heat integration due to the simplicity of the concepts.

Pinch analysis for thermal energy reduction has been widely used throughout the refining and petrochemical industries for several decades. Other industries such as chemicals, pulp and paper, and the food and beverage industries have also benefitted from pinch analysis. However, energy savings in such industries often require consideration of the interactions between mass and heat networks. Therefore, much recent progress in process integration has been focused on developing methodologies to combine heat integration and mass/water integration. The classical thermal pinch analysis technique was initially developed to analyze indirect-contact heat exchange in networks for energy use reduction and has evolved over recent decades to address key industry energy analysis and design needs such as (a) network retrofit, (b) stream mixing, and (c) site-wide energy analysis. Thermal pinch analysis has served these industry sectors well, even though many believe that thermal pinch analysis requires considerable experience, especially with regard to data extraction.

Although pinch analysis has been successfully used in retrofit situations, difficulties are encountered when considering constraints specific to each connection, especially if the network involves both direct- and indirect-contact heat exchanges. Pinch analysis requires summing of the heat loads in each temperature interval to obtain the composite curves and then setting a minimum temperature difference between these curves to identify the pinch temperatures and the minimum energy requirement. Consequently, the minimum energy requirement and the pinch temperatures, which

divide the network into two parts, are evaluated without considering constraints specific to each connection. Even in the ideal case for the application of pinch analysis, i.e., a network where all the connections are practically feasible and involve only indirect-contact heat exchanges, dividing the network into portions above and below the pinch by setting a common minimum temperature difference for streams with different heat-transfer coefficient values is a significant assumption. Pinch analysts sometimes include in the definition of each source and sink a value " $DT_{min}/2$ ", which represents the stream's contribution to the minimum temperature driving force. The composite curves of the process are computed using the value of the $DT_{min}/2$ contribution from each stream. This makes it possible to account for the different heat-transfer coefficient values. This approach is an improvement over using a global temperature difference; however it still does not allow temperature constraints to be set in accordance with the type of heat exchange taking place. Most industrial processes include both indirect-contact heat exchanges, where a minimum difference in stream temperature expresses the trade-off between energy savings and capital spending for classical heat exchangers, and direct-contact heat exchanges such as water mixing, stream reuse, or steam injection into liquid, where the constraints depend on the process. The type of exchange depends on the characteristics of the streams connected, so that a constraint on the difference in stream temperatures will be specific to the connection. For example, a demand for hot water may be satisfied by reusing hot water produced somewhere in the process, which requires a minimum temperature difference equal to zero, or by heating cold water using a source through indirect-contact heat exchange, where a sufficient temperature difference is necessary to limit the investment cost for surface area.

In summary, the practical constraints are specific to each connection. However, pinch analysis does not consider them because streams are lumped together. In consequence, data extraction, interpretation of targets, and identification of practical projects are complex in situations of retrofit or involving several types of heat transfer. Experience is essential, and for this reason, pinch analysis is considered by many to be an "art" incorporating many heuristics.

The hot, cold, and grand composite curves of pinch analysis are based on stream data only and do not include information about the existing heat exchanger network, although such information is important for HEN retrofit. The advanced composite curves [6, 7] include also information about the actual heaters and coolers in the HEN. These curves have been developed from the following observation: releasing heaters placed low in temperature and coolers placed high in temperature is usually less expensive than releasing other heaters or coolers, because fewer heat exchanger modifications and less exchange area are necessary. The advanced composite curves, four above the pinch and four below, provide in a single illustration the actual situation as well as the potential savings that would result from a reduced temperature difference, the actual locations of heaters and coolers in the network before retrofit, the theoretical upper and lower temperatures of each, and the excess heat, both directly available and potential. The advanced composite curves were developed from the observation of results obtained with the Matrix method [8]. In the Matrix method a reduced heat recovery temperature approach difference is first specified to reduce the heat consumption. The network is decomposed into two parts, above and below the new pinch resulting from the reduced approach temperature difference. Each part of the network is then rebalanced and redesigned by the user or an optimization algorithm with the help of detailed information on each connection gathered in a table ("matrix"). The Matrix method has confirmed

that the heat-savings potential of economically feasible projects in the initial HEN can be estimated before detailed design calculations.

The concept of structural targeting for HEN retrofit has been developed by Van Reisen et al [9, 10] from previous works about path analysis. Path analysis allows the identification of sub-networks of an existing network that have good economical retrofit potentials on their own. Each sub-network includes at least one heater and one cooler, and is evaluated by using established targeting tool. Consequently, part of the original network with high saving and profitability potential could be identified and treated separately.

The retrofit of a heat exchanger network (HEN) is basically a mixed-integer non-linear programming problem (MINLP). The retrofit decisions are functions of the economic environment and are dependent on the logistics, the process constraints, and the overall details of the installed network. The solution space needs to address options related to reassignments of matches, relocation of heat-exchanger units, and modifications to heat-transfer areas. Ciric and Floudas [11, 12] determined the energy target for the network and then proposed a mixed-integer non-linear programming (MINLP) model for the retrofit of HENs. This model incorporates all possible process stream matches, network configurations, and existing exchanger reassignments into a single mathematical formulation. Predetermination of the utility consumption can cause failure in area-utility trade-offs, and solutions may become trapped at local optima. Yee and Grossmann [13] developed a two-step approach in which the first step was a mixed-integer linear programming (MILP) pre-screening to determine the economic feasibility of the retrofit project. In addition, the number of new units that might be required in the final network was decided in this step. An MINLP formulation was then applied to find the optimized network. Because the MINLP model is detailed, different types of binary variables are needed in its formulation. This issue may restrict the application of the model to small-scale problems. Asante and Zhu [14-16] combined pinch technology and mathematical programming to simplify the retrofit procedure using a thermodynamic concept called network pinch. In their method, sequential MILPs are solved until a desired level of energy recovery is obtained. After the final structure has been determined, a non-linear programming (NLP) model is solved to minimize the total annual cost of the network and to determine the best configuration. The success of this approach is sensitive to the order of the MILPs, and sub-optimal networks may be obtained by different investigators for the same problem. Heuristics have been developed for path construction and HEN debottlenecking in network pinch approach [17].

Furman and Sahinidis [18] have shown that solving HENs either sequentially or with simultaneous formulations is non-deterministic polynomial-time hard (NP-hard). This suggests that the usefulness of deterministic methods such as the generalised Benders decomposition or outer approximation is limited and that stochastic methods like simulated annealing (SA), tabu search (TS), and genetic algorithm (GA) are more useful approaches for tackling such problems.

HEN retrofit using stochastic methods was first suggested by Athier *et al.* [19], who coupled simulated annealing with an NLP method. Structural parameters were modified by SA, and continuous ones were handled in the NLP section. Because SA cannot search the whole solution space, this procedure must be repeated until the best network is achieved. Moreover, the authors had some problems in obtaining convergence of the NLP because of the need for simultaneous

optimization of the continuous variables. Bochenek and Jezowski [20] and Jezowski *et al.* [21] proposed a method based on a GA and the network pinch concept, which optimized both integer and continuous parameters using the GA. Although the GA is the best approach for dealing with discrete variables, it is too slow to manage continuous ones. This makes their method time-consuming; it takes 10 h to run even for a small-scale network. It seems that the genetic algorithm is suitable for structural optimization because of its discrete nature and its strong ability to search the solution space completely without becoming trapped at local optima. Rezaei and Shafiei [22] addressed the revamping of heat-exchanger networks using a GA coupled with non-linear programming (NLP) and integer linear programming (ILP) methods. Structural modifications were carried out by the GA, which used a node representation to address exchanger locations. Continuous variables were handled using a modified NLP formulation for maximum energy recovery. An ILP problem was then solved to determine the minimum investment cost of modifications by the elimination or reuse of current exchangers and the introduction of new ones to the network.

1.3. Synthesis of literature review

Optimization models for HEN retrofit are highly complex and do not guarantee reaching the global optimum. As a consequence, approaches based on pinch analysis are the most widely used. Although many developments have been performed to apply this tool to HEN retrofit and non-isothermal mixings, difficulties in data extraction, targeting and redesign of network are still encountered.

The energy is conserved and degraded. Heat from the hot utility is either stocked in chemical energy or sent to the environment where the degradation level is maximal. To reduce the energy demands at the heating utility level implies reducing the flow rate of heat transferred from the heating utility through the existing heat exchanges until rejection to the environment. This progressive transfer of heat in the existing heat exchanges from the heating utility to the environment is not explicitly analyzed in the present methods for HEN retrofit. The advanced composite curves are the closest method to this analysis of heat degradation; these curves do represent the heat transfer in the existing heaters and coolers, but do not represent the heat transfer in the existing process-process heat exchangers.

1.4. Objectives of the paper

This paper presents the concepts of a systematic approach for HEN retrofit which is explicitly based on the two first principles of thermodynamics, i.e. energy conservation and degradation. Heat is degraded from the heating utility to the environment through existing heat exchanges. To save energy implies reducing the flow rate of heat transferred between the heating utility and the environment. More specifically, the objectives of the paper are the following:

- To make explicit the fundamental set of modifications that reduces the heat consumption, termed a “bridge” in this paper.
- To present a procedure that systematically identifies bridges.

- To present a heat transfer diagram showing the bridges.
- To present a network table that can be used to easily evaluate bridges and other modifications.

1.5. Organization of the paper

Terminology and conventions are presented in the next section. The concept of heat bridge is explained in Section 3. In Section 4 a procedure for the systematic identification of bridges is described. A heat transfer diagram showing the heat degradation through the heat exchangers from the utilities to the environment, which can be used to identify bridges, is presented in Section 5. Section 6 proposes a table in which network data are organized to identify, to evaluate and to design heat saving modifications. Section 7 presents the conclusion. A global procedure for HEN retrofit and case studies are presented in a second paper.

2. Terminology and conventions

The terminology and conventions which are necessary to present the concepts are here described.

Heat is transferred from a source which involves either a process source or a heating utility, to a sink which involves a process demand, a cooling utility or the environment. Notice that heat removed by a cooling utility is ultimately rejected to the environment. A supplier is the part of a source that is cooled in a heat exchange unit. A receptor is the part of a sink that is heated in a heat exchange unit. A heat exchange unit may be a heater H , an internal heat exchanger E , or a cooler or any system to evacuate the heat to the environment C . A match between supplier c_1^s of cooler C_1 and receptor e_1^r of internal heat exchanger E_1 is described by the following notation $c_1^s e_1^r$. A heat outlet is energy that is sent to the environment and represents waste heat. A heat bridge is a set of matches that reduces the flow rate of heat transferred from the heating utility to the environment; it corresponds to a heat transfer from heat outlets to heating utility users through new matches. The symbols are listed hereafter. The supplier in a heater comes from a heating utility HU . Heat is sent to the environment through a cooling system. A match is a couple composed of a supplier and receptor. For example, the match corresponding to heater H_z is noted $h_z^s h_z^r$. These conventions are summarized in Table 1.

$a_m^s b_n^r$: Match between supplier of A_m and receptor of B_n , where A_m and B_n can be a heater, an internal heat exchanger, or a cooler.

c_x^r : Receptor of cooling system C_x

c_x^s : Supplier of cooling system C_x

C_x : Cooling system

CU : Cooling utility

E_y : Internal heat exchanger

e_y^r : Receptor of internal heat exchanger E_y

e_y^s : Supplier of internal heat exchanger E_y

Env : Environment

H_z : Heater

h_z^r : Receptor of heater H_z

h_z^s : Supplier of heater H_z

HU : Hot utility

T_c : cold-end temperature

T_h : hot-end temperature

Table 1: conventions for heat exchanges

Equipment	Cooling system, C_x	Internal heat exchanger, E_y	Heater, H_z
Match	c_x^s c_x^r	e_y^s e_y^r	h_z^s h_z^r
Source stream	Process sources		Heating utility, HU
Supplier	c_x^s	e_y^s	h_z^s
Heat transfer	↓	↓	↓
Receptor	c_x^r	e_y^r	h_z^r
Sink stream	Environment, Env	Process demand	

Figure 1 show the proposed conventions in the grid diagram of a simple network composed of two sources and two demands. This example will be used in the paper to clarify the description of concepts.

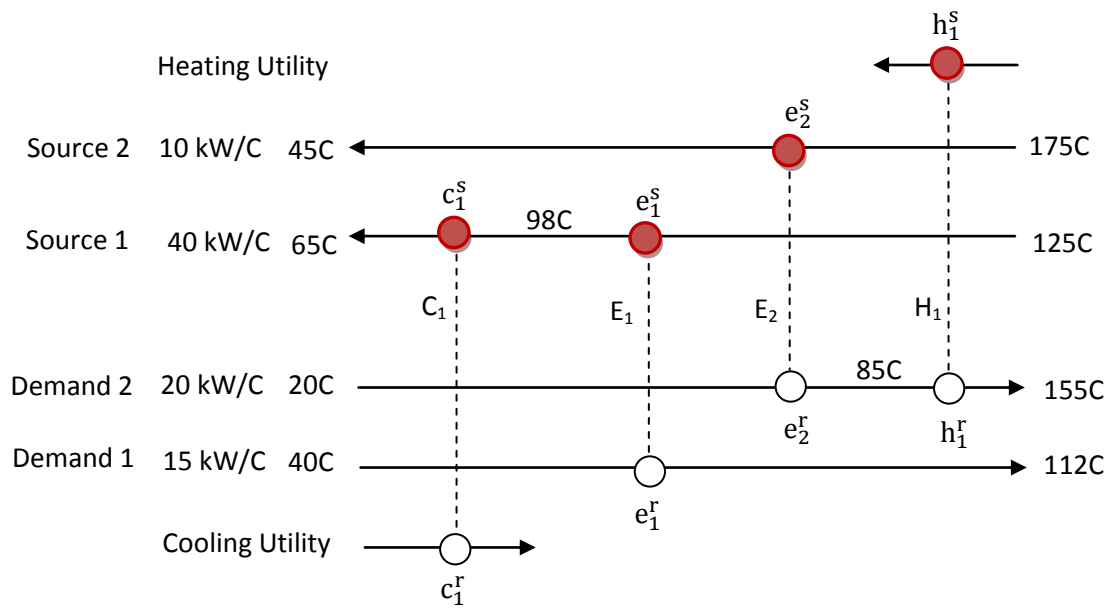


Figure 1: example of HEN used in this paper, with conventions.

3. Heat Bridges

This section presents the modifications strictly necessary to reduce the heat consumption by HEN retrofit. From the energy conservation principle, the energy savings are equal to the reduction of heat outlet flow rate. To decrease the heat consumption in a HEN implies reducing the flow of heat cascaded between the heating utility and the environment through heat exchanges. The fundamental mechanism to reduce the energy consumption by HEN retrofit implies bridging a heat outlet to a heating utility user (figures 2).

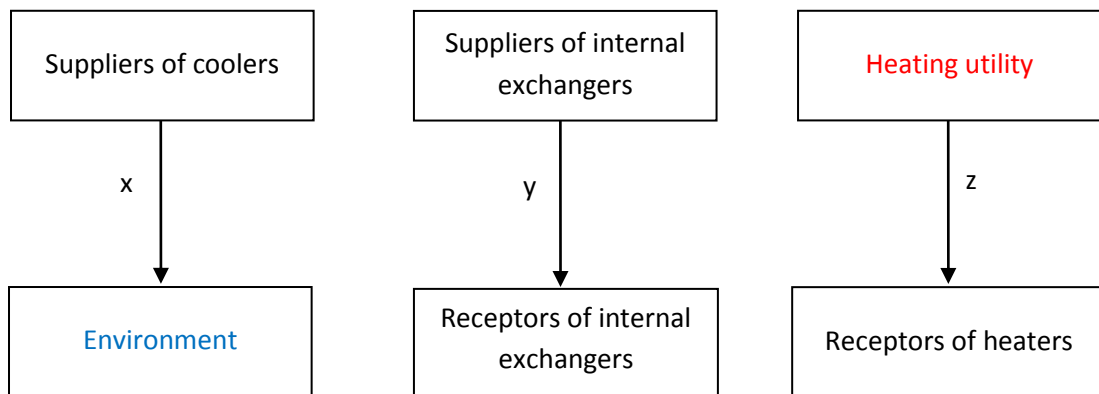


Figure 2a: initial heat transfers

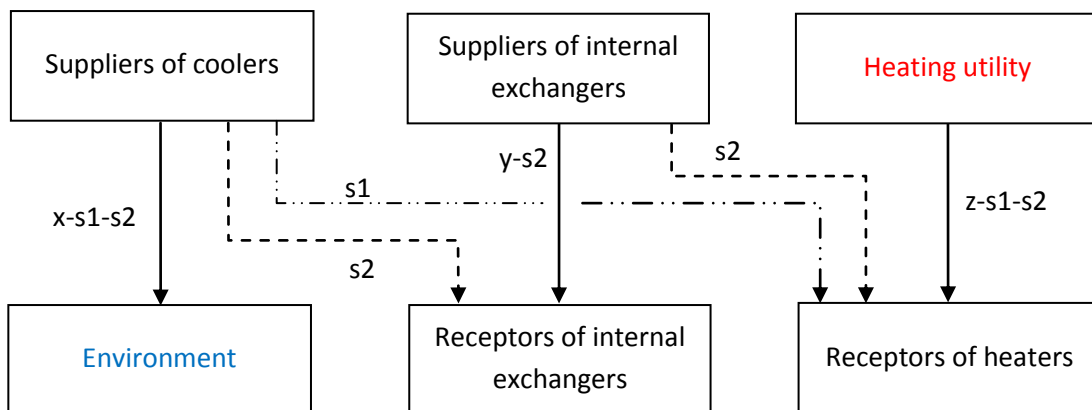


Figure 2b: heat transfers after $(s1+s2)$ heat savings

Figures 2: to save heat implies bridging a heat outlet to a heating utility user.

Arrows show heat transfers

3.1. Prime and composite bridges

For a given set of streams only a bridge can lead to heat savings. A bridge is a set of matches that bridges heat outlets to heating utility users. Remember that a match is a coupling between a heat supplier and a heat receptor. Each match in a bridge has the possibility to participate to a heat transfer from a heat outlet to a heating utility user. A bridge is the heat savings part of a retrofit program.

A prime bridge is a set of the following form:

$$\begin{aligned} & \{c_x^s h_z^r\} \\ & \text{Or} \\ & \{c_x^s e_{y1}^r, e_{y1}^s e_{y2}^r, \dots, e_{yn-1}^s e_{yn}^r, e_{yn}^s h_z^r\} \end{aligned}$$

Where x is the label of a cooler C , z is the label of a heater H , and $\{y1, \dots, yn\}$ is a subset of n distinct labels of internal exchangers E .

The mechanism of a bridge is the following. Heat from a cooler supplier is used to a receptor, whose released supplier is reused. Once a receptor is heated by a supplier other than the existing, then the existing supplier can be released and heat another receptor.

Examples of prime bridge are the following:

- $\{c_1^s h_1^r\}$
- $\{c_1^s e_1^r, c_1^s h_1^r\}$
- $\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_2^r, e_2^s h_1^r\}$

A prime bridge cannot be decomposed into other bridge structures. Figures 3 show prime bridges with one, two, and three matches in a grid diagram. The maximal number of matches in a prime bridge is theoretically equal to the number of heat exchangers plus one. The maximum number of prime bridges with m new matches $N(\text{prime})_m$ is expressed by equations 1 and 2. In practice, the number of relevant prime bridges is severely limited after connection constraints and heat savings capacity are taken into account.

$$N(\text{prime})_1 = N_c \times N_H \quad (\text{Equation 1})$$

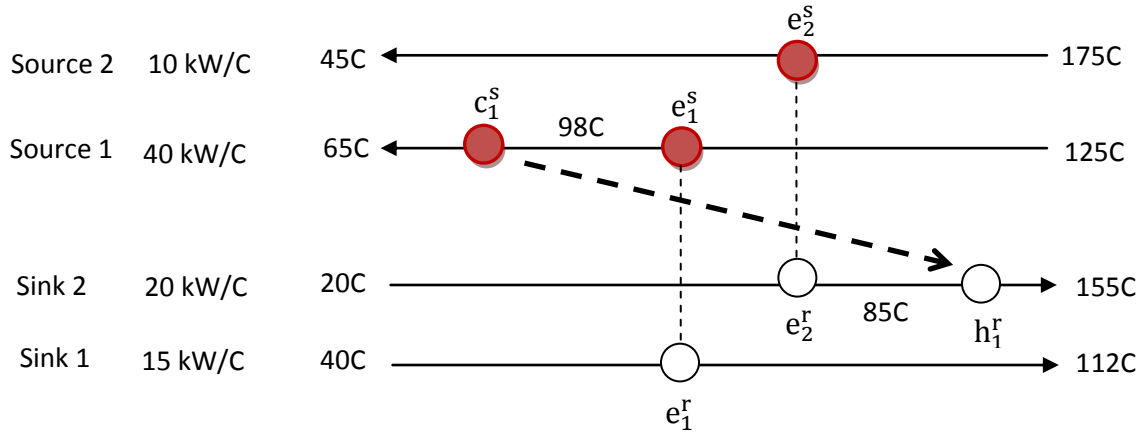
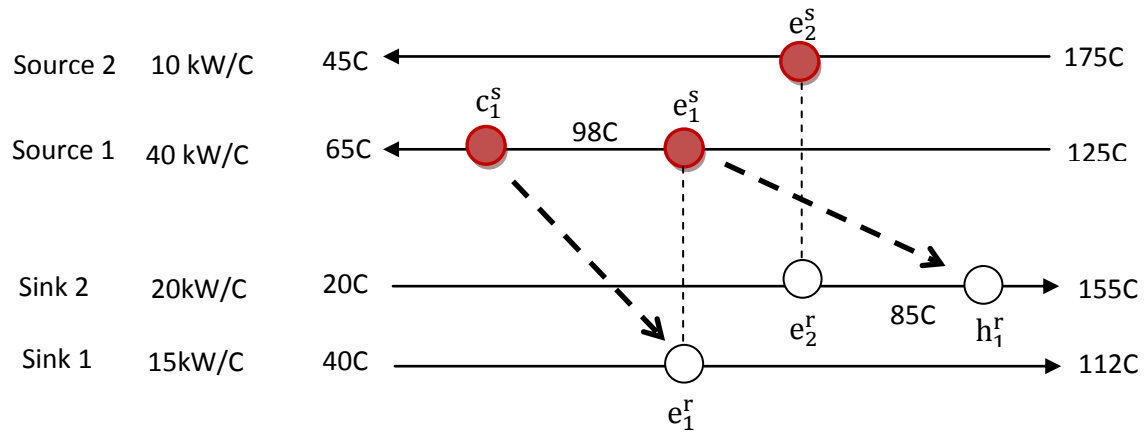
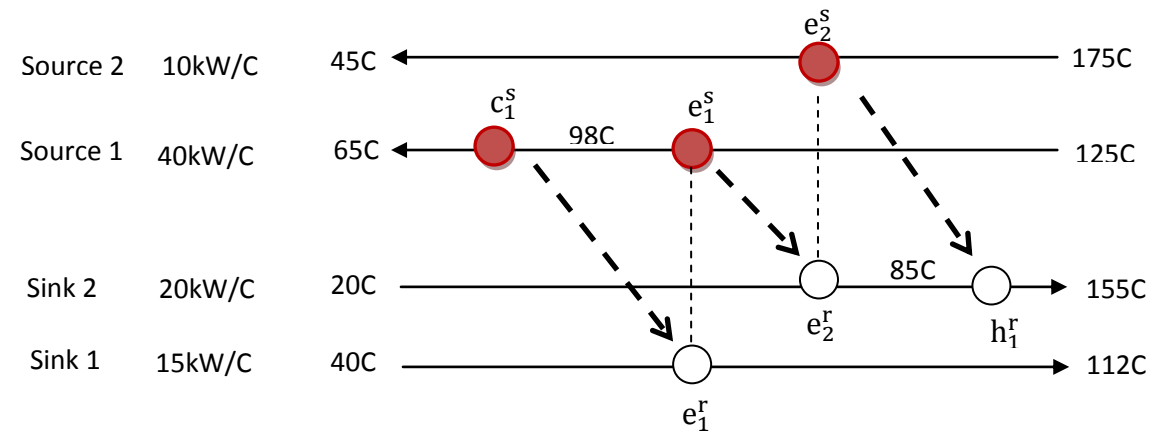
$$N(\text{prime})_{m \geq 2} = N(\text{prime})_{m-1} \times (N_E - m + 2) \quad (\text{Equation 2})$$

Where:

N_c : number of coolers

N_H : number of heaters

N_E : number of internal heat exchangers.

Figure 3a Prime Bridge: $\{c_1^s h_1^r\}$ Figure 3b Prime Bridge: $\{c_1^s e_1^r, e_1^s h_1^r\}$ Figure 3c Prime Bridge: $\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_2^r, e_2^s h_1^r\}$

A composite bridge is a set obtained via a finite union of prime bridges. Consequently, a composite bridge can be decomposed into other bridges.

Examples of composite bridge are the following:

- $\{c_1^s e_1^r, c_1^s h_1^r, e_1^s h_1^r\}$
- $\{c_1^s e_1^r, c_1^s h_1^r, e_1^s e_2^r, e_2^s h_1^r\}$
- $\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_2^r, e_1^s h_1^r, e_2^s h_1^r\}$

3.2. Distinction between “bridge” and “cooler-heater path”

A HEN includes a “heater-cooler path” if a cooler and a heater are connected by horizontal and vertical lines in the corresponding grid diagram. A path is the set of lines between a cooler and a heater. A path is a structural characteristic of a heat exchanger network and is not a set of modifications. The presence of a heater-cooler path in the HEN before or after retrofit is not necessary for achieving heat savings.

A bridge is a fundamental set of modifications for heat savings. Bridges are identified systematically without taking into account paths or any other structural characteristics of the network. If bridge modifications occurring along a path result in profit thanks to lower investment costs, this will be identified.

Finally note that the heat transfer diagram which is presented later in this paper is fundamental; it represents the effects of the first and second principles of thermodynamics (energy conservation and energy degradation) in the HEN before retrofit. This diagram shows that only bridges can lead to heat savings by HEN retrofit. All the bridges can be identified on this diagram. The diagram does not show paths.

3.3. Evaluation of a bridge

Evaluation of heat savings capacity and approximated investment cost of a bridge structure

The fixed cost of investment can be estimated by new matches included in a bridge. Evaluation of the maximum heat savings and minimum heat exchange surface area corresponds to a small Linear Programming (LP) problem. Either a transshipment model involving a heat cascade or a transportation model can be used for evaluating the maximum heat savings. The use of a transportation model is necessary to evaluate the exchange surface area. Decision variables are heat flow rates through matches included in the bridge. Optimization can easily be performed with Excel solver or other LP solvers by using directly the format of the second-decomposition table which fits the transportation model and is presented later in this paper. The formulation of transportation model for the evaluation of bridge heat savings capacity is joined in the annex part of this paper.

Detailed evaluation and final HEN topology

The final network topology can be performed either by engineering analysis or optimisation. The optimisation formulation implies the use of binary variables to take into account design constraints. A MILP or MINLP formulation can be used to identify the final network topology. The MILP formulation developed by Pettersson [23] or Barabaro et al [24] is particularly convenient because they use a transportation model for heat exchanges, which perfectly fits the network table described later in this paper. The optimization algorithm would only search variables corresponding to bridge modifications. A MINLP formulation based on a superstructure also could be convenient. Only the variables corresponding to the bridge modifications are allowed to be modified; consequently the size of the optimization problem is reduced. The choice of the final topology should also consider operability criteria, which include flexibility, controllability, reliability, safety, and easy start-up and shut-down.

4. Identification of bridges

Bridges are basic sets of matches for saving energy. The following approach, which involves three screenings, is proposed in order to enumerate with a reduced number of operations the relevant heat savings modifications. The first screening involves excluding useless matches. Potential matches are those that can be included in practical prime bridges. The second screening involves using rules to construct bridges. The third screening involves excluding the useless bridges from the enumeration thanks to a progressive addition of matches. The section hereafter only describes a proposed strategy for the systematic identification of bridges. A global procedure for HEN retrofit, from data extraction to the identification of the final network topology, is described in the second part of the paper.

4.1. First screening: exclusion of useless matches from the set

If a match cannot participate in any relevant prime bridge, then this match shall be excluded. Each match is tested according three successive criteria. If a criterion is not satisfied for a match, then this match is excluded from further consideration.

- Criterion 1: The match is practically feasible, or its fixed cost is smaller than a predefined threshold value.
- Criterion 2: The maximal possible heat transfer for the match is greater than Q_{min}^{match} . A minimum temperature difference specific to the match is set in order to evaluate its heat transfer capacity.
- Criterion 3: The match can be included in at least one relevant prime bridge.

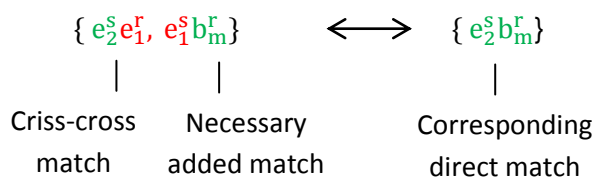
The third selection criterion involves listing all possible prime bridges that only include matches passing the second test, evaluating their heat savings capacity and estimating their investment cost. A prime bridge is relevant if it can be used in practice and result in profit. The set of potential matches is obtained by the union of relevant prime bridges. As a result, the set of potential matches is a bridge structure. The identified bridges will be subsets of the set of potential matches.

Consideration about the number of matches in a prime bridge

The maximal number of matches in a prime bridge is theoretically equal to the number of heat exchangers plus one. However the profit depends on heat savings and investment cost. Fixed costs of investment increase with the number of matches. Heat savings of prime bridges decrease after a certain number of matches because heat savings are upper-bounded by the smallest capacities of included matches. This means that in practice the number of matches for a relevant prime bridge is limited. Sometimes prime bridge structures may include a relative high number of matches (e.g. four or five) and imply only a small number of new connections between streams; this is the case if matches are situated on a cooler-heater path. The number of new connections between streams is a criterion that limits the number of matches in a prime bridge.

Consideration about matches resulting in new criss-cross heat transfer

Any new match with exergy loss $e_2^s e_1^r$ results in supplementary criss-cross heat transfer. Half of the new matches result in criss-cross transfer. These matches are thermodynamically unfavorable for heat savings projects. However some of them may be selected in the set of potential matches if these provide practical advantages. The use of the direct match instead of a sequence of two (criss-cross match followed by an added match) would result in less exchange area and greater or equal heat savings. However the fixed investment cost for this direct match might be greater than that corresponding to the sequence of two, or the direct match may be not practical. A prime bridge that includes a match with exergy loss is considered as relevant if it is more profitable than its corresponding prime bridge which includes the direct match.



4.2. Second screening: Addition of matches with respect to bridge conditions

The fundamental mechanism to reduce hot utility consumption is a heat transfer between heat outlets and hot utility users through a set of matches; this transfer is termed a bridge. Composite bridges can be identified by a simple combination of prime bridges. However the use of following rules is proposed to reduce the number of operations. The principle is simply to define the conditions a bridge must respect.

Bridge conditions
<p>A bridge must respect the following conditions:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. At least one match with c_x^s is necessary. 2. Each match with e_y^r implies at least one match with e_y^s. 3. Each match with e_y^s implies at least one match with e_y^r. 4. At least one match with h_z^r is necessary. 5. Matches with h_z^s or c_x^r are forbidden.

The advantage to identify only bridges is described hereafter.

The number of possible new matches A is equal to the total number of possible matches minus the number of existing matches:

$$A = (N_{HU} + N_E + N_C) * (N_{CU} + N_E + N_H) - N_{HU} * N_{CU} - N_E - N_C - N_H \quad (\text{Equation 3})$$

With:

N_E : Number of internal heat exchangers

N_H : Number of heaters

N_C : Number of coolers

N_{HU} : Number of heating utilities

N_{CU} : Number of cooling utilities

If $N_{HU} = N_{CU} = 1$, then A is expressed as the following:

$$A = (N_E + N_C) * (N_E + N_H) + N_E. \quad (\text{Equation 4})$$

The number of possible combinations of new matches is expressed by the following relation:

$$N_m^A = \frac{A!}{(A-m)!m!} \quad (\text{Equation 5})$$

Where A is the number of possible new matches and m the number of new matches in the combination

The set of possible bridge structures is a sub-set of all possible match combinations. As a result, the number of binary variables corresponding to the matches in the optimization problems for heat-

exchanger network retrofit is reduced by identifying only bridges. Table 2 compares the sets of possible combinations and the sets of bridge structures for several sizes of heat-exchanger network. For any values of A and m , the number of bridge structures is much fewer than the number of possible combinations. The number of bridge structures to be identified can be further dramatically reduced by using the two other screenings. To identify only the bridge structures results in a reduction in the number of possible combinations of matches; consequently to identify only bridges reduces the search space.

Table 2: Effect of second screening alone - Use of bridge conditions

N_C	N_E	N_H	N_{HU}	N_{CU}	A	m	N_m^A	Number of bridges
1	2	1	1	1	11	3	165	4
2	2	2	1	1	18	3	816	52
2	3	2	1	1	28	3	3,276	88
2	4	2	1	1	40	4	91,390	701
3	5	3	1	1	69	4	864,501	6,606
5	15	5	1	1	415	6	6.8 E+12	8.7 E+06

4.3. Third screening: exclusion of useless bridges from the enumeration

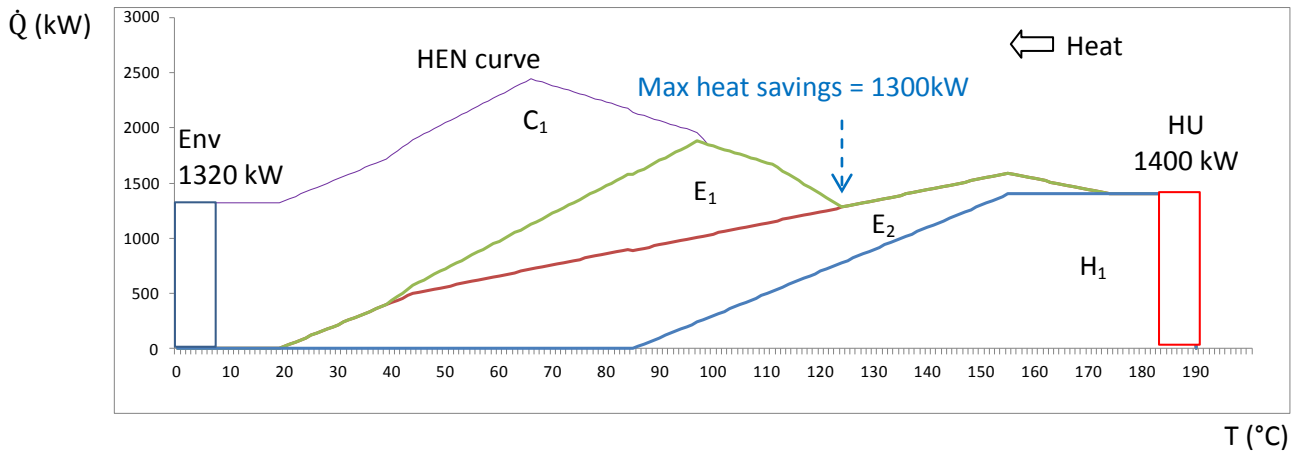
The objective of this screening is to exclude useless bridges from the search. The addition of matches to a bridge structure results in increased investment cost. The resulting bridge is considered as “useful” if its heat savings capacity strictly increases. Note that the heat savings capacity of a bridge never decreases by adding matches. The principle involves identifying new bridges by only adding a minimum number of matches to “useful” bridges. “Adding a minimum number of matches” means that all the added matches are necessary to respect the bridge conditions (a removal of any added match would result in a set that does not respect the bridge conditions). The procedure stops when either no more useful bridge is identified, or a maximal number of matches in a bridge are reached.

Procedure:

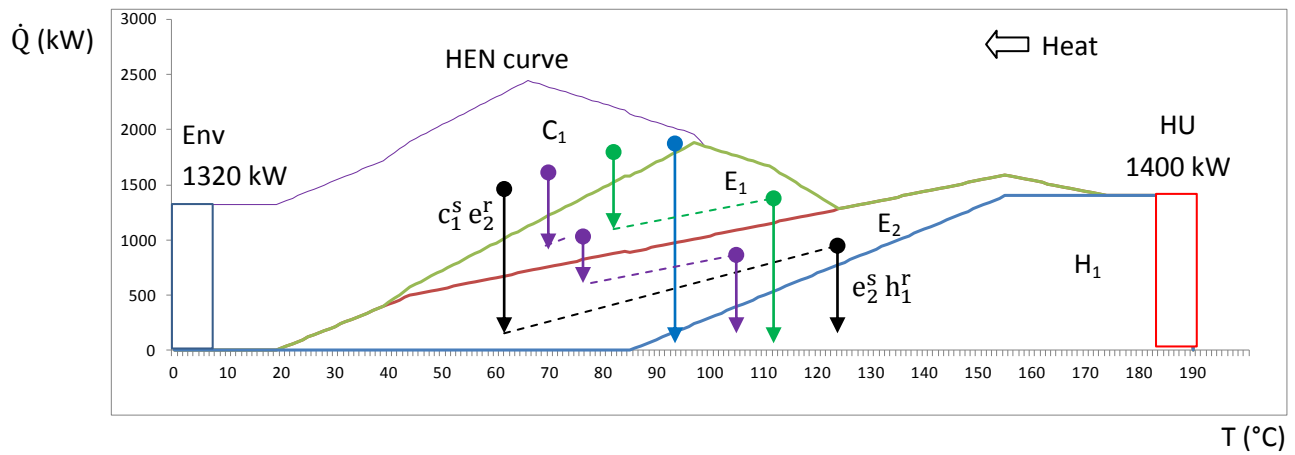
- Starting sets are prime bridges included in the set of potential matches.
- Addition step: a minimal number of matches are added to useful bridges with respect to bridge conditions.
- If the heat savings of a resulting bridge increase, then this new bridge is useful.
- If the number of matches included in the bridges is less than a maximum, then return to the addition step.

5. Heat transfer diagram

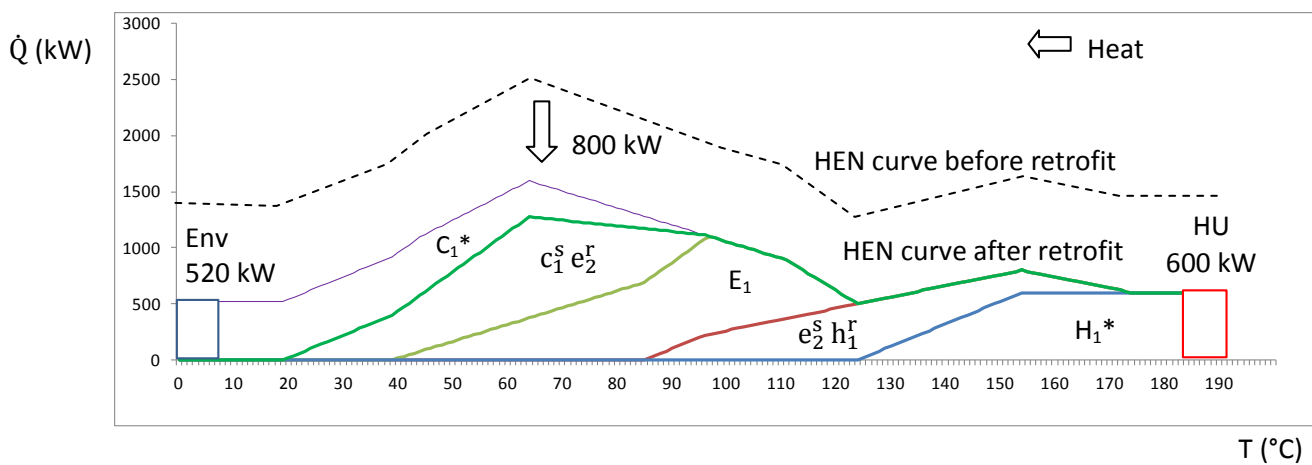
In a heat transfer diagram, the flow rate of heat cascaded in each exchanger is plotted as a function of temperature (figures 4). The analysis of heat degradation between the heating utility and the environment through the heat exchangers and process operations leads to the identification of heat savings modifications. Bridges are fundamental sets of heat savings modifications in the HEN. All the bridges can be identified with a heat transfer diagram. To reduce the heat consumption by HEN retrofit implies reducing the flow rate of heat transferred between the heating utility and the environment through the heat exchangers. If the curves corresponding to the heat exchangers are sorted in the diagram according to decreasing hot-end temperature of supplier, then each downward arrow corresponds to a new thermodynamically favourable match and each upward arrow corresponds to a new criss-cross match. To save energy implies shifting down the total HEN curve by bridging a heat outlet to a heating utility user through new matches. The prime bridges including only thermodynamically favourable new matches for the example are shown in figure 4b. The result from bridge $\{c_1^s, e_2^r, e_2^s, h_1^r\}$ is shown in figure 4c. The total HEN curve has been down-translated by the heat savings capacity of this bridge, i.e. 800 kW. The maximum heat savings achievable without any connection constraint is equal to the minimum value of the total HEN curve. The maximum heat savings achievable with respect to a specific minimum temperature difference between suppliers and receptors is equal to the minimum value of the total HEN curve after a corresponding shifting of suppliers and receptors along the temperature axis.



4a: Diagram showing the flow rate of heat between HU and the environment



4b: Arrows show matches of prime bridges. Matches of bridge $\{c_1^s e_2^r, e_2^s h_1^r\}$ are indicated.



4c: Network after bridge modifications $\{c_1^s e_2^r, e_2^s h_1^r\}$ resulting in 800kW savings

Figures 4 Heat transfer diagram corresponding to the example

6. Network table

A table useful for the identification and evaluation of bridges is hereafter presented. At first, this table resulted from the research for a strategy to systematically identify bridges. The concepts of exclusion of useless matches, addition of matches with respect to bridge conditions, and exclusion of useless bridges from the enumeration were all developed by using a table. Later this table was also found to be useful to evaluate bridges and to identify the final HEN topology.

In first-decomposition table, streams are simply decomposed into suppliers and receptors according to the initial network to provide an overall view on retrofit possibilities. In second-decomposition table, suppliers and receptors are decomposed into smaller temperature intervals according to a thermodynamic transferability criterion, i.e., a minimum temperature difference specific to each connection. This makes it possible to evaluate modifications, such as heat flow rates and exchange surface area, and to identify the final network topology. These applications are summarized in Table 3. Figure 5 shows the example network in an x-y grid diagram closely related to the network table. If suppliers and receptors are sorted according to their increasing hot-end temperature in this diagram, then crossing lines mean criss-cross heat exchangers. In the example network, E1 and E2 are criss-cross heat exchangers.

Table 3: Differences between tables resulting from first and second decompositions

Type	Criteria for stream decomposition	Applications
First-decomposition table	<ul style="list-style-type: none"> Suppliers and receptors in initial HEN 	<ul style="list-style-type: none"> Overall view on possible modifications Evaluation of heat savings upper-bounds of prime bridges
Second-decomposition table	<ul style="list-style-type: none"> Suppliers and receptors in initial HEN Thermodynamic transferability 	<ul style="list-style-type: none"> Evaluation of bridges: heat savings and investment cost Identification of final HEN topology

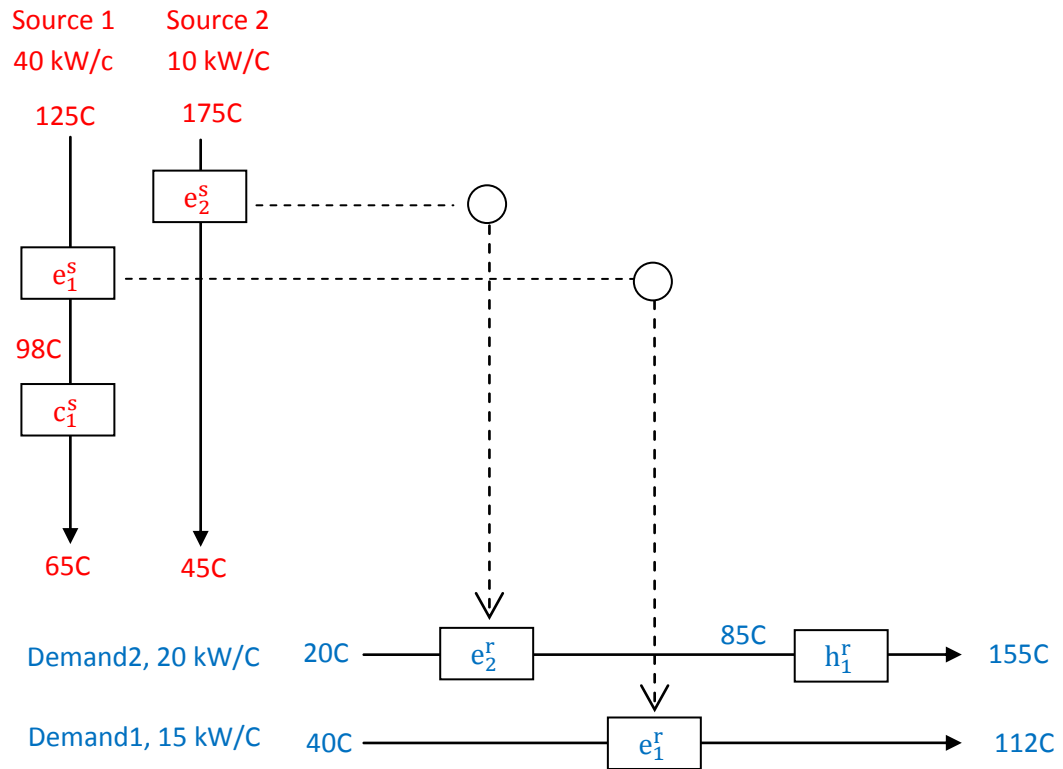


Figure 5: Example represented in an x-y grid diagram which is related to the network table.

6.1 Table resulting from first decomposition

In first-decomposition table, sources and demands are decomposed into suppliers and receptors in the initial network. Each row corresponds to a supplier; each column corresponds to a receptor. Each intersection between a row and a column represents a potential or existing match. Borders separate the streams in the table. This table provides a bird's eye view about the network and possible modifications, e.g. heat savings upper-bounds of prime bridges. Information about matches can be added, e.g. practical feasibility, investment cost, temperature difference, heat-exchange capacity or exergy variation. Figure 6 shows the heat-exchange capacities for a minimum temperature difference of 10°C in any match. The appearances of cells corresponding to existing or potential matches are different. It can be seen that no loops or paths are present; matches $c_1^s e_2^r$ and $c_1^s h_1^r$ together require one new connection between source1 and demand2; matches $c_1^s e_1^r$ and $e_2^s h_1^r$ do not require any new connections between streams, but only modification of existing exchangers.

Figure 6: First-decomposition table with heat-exchange capacities in kW

Source 2	e_2^s	1300	(1300)	(1080)	1300	(800)
Source 1	e_1^s	1080	(1080)	1080	(1080)	(600)
	c_1^s	1320	1320	(720)	(1300)	(60)
Hot utility	HU	1400	Savings	(1080)	(1300)	1400
		1320		1080	1300	1400
		CU		e_1^r	e_2^r	h_1^r
		Env.		Demand 1		Demand 2

Figure 7: First-decomposition table after bridge modifications $\{c_1^s e_2^r, e_2^s h_1^r\}$

Source 2	e_2^s	1300	500		800
Source 1	e_1^s	1080		1080	
	c_1^s	1320	20		1300
Hot utility	HU	1400	800		600
		1320		1080	1300
		CU		e_1^r	e_2^r
		Env.		Demand 1	h_1^r
				Demand 2	

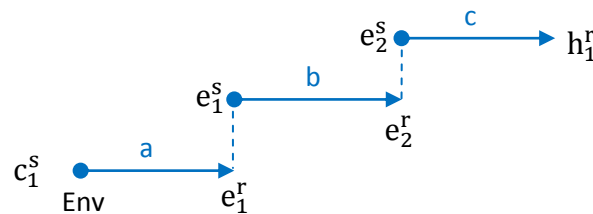
Evaluation of heat flow upper bounds through a set of modifications using first-decomposition table

Minimum temperature difference specific to a connection

To evaluate the heat-exchange capacity of a match, a heat exchanger local minimum temperature difference ΔT_{min} is specified. This match specific minimum temperature difference can be estimate from engineering experience, or evaluated from price of utilities and exchange surface area, and heat transfer coefficients of involved streams.

Evaluation of upper bounds of heat flow rate through a set of matches

Heat flow rates in series are limited by the smallest exchange capacity of involved individual matches (figure 8). Heat flow rates in parallel, i.e. flows through several matches involving a same receptor or supplier, are limited by the capacity of combined matches.



Heat flow rate $\leq \min$ (capacity (a), capacity (b), capacity (c))

Figure 8: Heat flow rates in series are upper-bounded by the minimum capacity of individual matches

Upper-bounds of prime bridge heat savings are the following (exchange capacity of each match is indicated):

$\{c_1^s h_1^r (60\text{kW})\}$	Max heat savings = 60 kW
$\{c_1^s e_1^r (720\text{kW}), e_1^s h_1^r (600\text{kW})\}$	Max heat savings = 600 kW
$\{c_1^s e_2^r (1300\text{kW}), e_2^s h_1^r (800\text{kW})\}$	Max heat savings = 800 kW
$\{c_1^s e_1^r (720\text{kW}), e_1^s e_2^r (1080\text{kW}), e_2^s h_1^r (800\text{kW})\}$	Max heat savings = 720 kW

Figure 7 shows the network resulting from bridge $\{c_1^s e_2^r (1300\text{kW}), e_2^s h_1^r (800\text{kW})\}$. 1300kW heat has been transferred from c_1^s to e_2^r ; consequently e_2^s is completely released and can transfer 800kW to h_1^r ; the 500kW excess of e_2^s is sent to the environment. Consequently the heat consumption is reduced by 800kW. This amount of heat savings is written in the cell at the intersection between the hot and cold utilities. The sum of heat transfers in any row and column is constant, which results from the energy balance.

The steps necessary to build first-decomposition table are the following:

1. Decompose streams into suppliers and receptors in the initial HEN.
2. Identify heat load, T_c , and T_h for each supplier and receptor.
3. Determine the practical feasibility of each connection.
4. Add information to the table, e.g., the heat-exchange capacity of allowed matches.

6.2 Table resulting from second decomposition

To evaluate heat flow rates through a set of matches, decomposition into temperature intervals is carried out according to the criterion of minimum temperature difference. Only the supplier part at a temperature higher than the receptor cold-end temperature plus ΔT_{min} and the receptor part at a temperature lower than the supplier hot-end temperature minus ΔT_{min} are usable for heat exchange.

Decomposition into temperature intervals

Receptors are decomposed according to the hot-end temperatures of the supplier intervals if the corresponding match is allowed. Suppliers are decomposed according to the cold-end temperatures of the receptor intervals if the corresponding match is allowed.

The decomposition into temperature intervals for the example network with a minimum temperature difference equal to 10°C for each match is shown on figure 9.

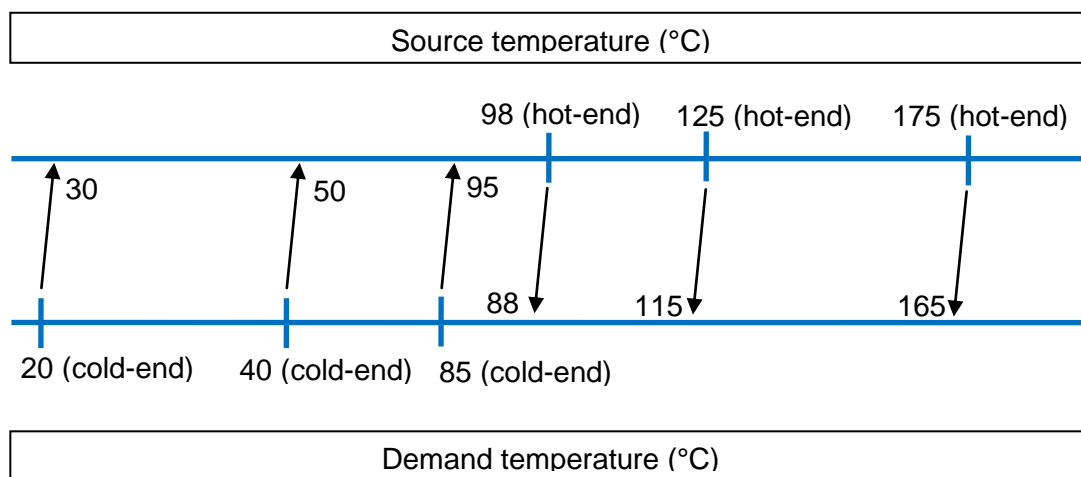


Figure 9: decomposition into temperature intervals for the example network

Second-decomposition table corresponding to the initial exchanges of the example with a counter-current configuration of heat exchangers is shown in figure 10. Variables in the table are heat flow rates in kW and split fractions of suppliers and receptors in each temperature interval. A HEN is completely defined in the table by either the heat flow rates, or split fractions and exchanger configuration (co- or counter-current). Through network modifications, the sum of heat flows in any row and any column is constant, which is due to energy balance constraint. The change in utility consumption is indicated in the “savings” cell at the intersection between the cold and hot utilities. Figure 11 shows the network resulting from the bridge $\{c_1^s h_1^s\}$.

The steps necessary to build second-decomposition table are summarized below.

1. Decompose streams into suppliers and receptors.
2. Identify heat load, T_c , and T_h for each supplier and receptor.
3. Determine the practical feasibility of each connection.
4. Set a minimum temperature difference specific to each connection.
5. Decompose suppliers and receptors into temperature intervals.
6. Make the distinction between transferable and non-transferable areas.
7. Add data on the initial heat exchanges.

Evaluation of modifications using second-decomposition table

The fixed cost for investment can be estimated by new matches included in bridges. Evaluation of the maximum heat savings corresponds to a small Linear Programming (LP) problem which can easily be performed with Excel solver. The variables of the transportation model for heat exchanges are explicit in second-decomposition table. The objective function to minimize is the heat consumption. Decision variables are heat flow rates in the table cells. The constraints are the following: the sum of heat flow rates in each row and column is constant, heat flow rates are positive, and only heat flow rates related to bridge matches can be modified. The exchange surface area necessary for heat transfers is simply a linear combination of heat flow rates in the table cells, as shown in equation 6. Only variables included in bridge are allowed to be modified. The formulation of transportation model for the evaluation of bridge heat savings capacity is joined in the annex part of this paper. No constraint on split fraction variables is used to evaluate the heat savings capacity of a bridge.

$$area_{i,j,k,l} = \frac{q_{i,j,k,l}}{U_{i,k} * \Delta Tlm_{i,j,k,l}} \quad (\text{Equation 6})$$

With:

$area_{i,j,k,l}$	Exchange surface area necessary for heat transfer in table cell i, j, k, l .
$q_{i,j,k,l}$	Heat flow rate from supplier i at temperature interval j to receptor k at temperature interval l
$U_{i,k}$	Heat transfer coefficient between supplier i and receptor k
$\Delta Tlm_{i,j,k,l}$	Pre-evaluated log mean temperature difference between supplier i at temperature interval j and receptor k at temperature interval l

Identification of the final HEN topology

The network topology can be identified by either engineering analysis or mathematical programming. The use of binary variables is necessary to represent the topology constraints, which are related to the split fractions. In terms of the transportation formulation, an exchanger unit must have the same split fraction in each temperature interval participating in the heat transfer for a certain match. Only the first and the last element in a sequence of active temperature intervals may have lower values to indicate that the heat transfer does not necessarily begin or end exactly at the boundaries of the intervals. The MILP formulations developed by Pettersson [23] or Barbaro et al [24], which are based on the transportation model, can be used to identify the final HEN topology. Decision variables are limited to those related to the bridge modifications.

7. Conclusions

The following has been presented in this paper:

- The fundamental set of modifications to save energy, which is made explicit and termed a “bridge”.
- A method to enumerate the bridges.
- A heat transfer diagram which can be used to identify the bridges.
- A network table to easily evaluate them

The energy is conserved and degraded through heat exchanges and process operations. To reduce the heat consumption implies reducing the flow rate of heat from the heating utilities to the environment. The fundamental mechanism to reduce the heat consumption by HEN retrofit, which implies a “bridge”, has been presented. A bridge is a heat transfer between heat outlets and heating utilities users through a set of matches. This concept can be used in insight- or optimization-based approaches for HEN retrofit.

The bridges can be identified with a grid diagram, a heat transfer diagram, a network table, or a formal algorithm. An approach for a systematic identification of bridges has been presented. It involves the following screenings: the exclusion of useless matches, the addition of matches with respect to bridge conditions, and the exclusion of useless bridges from the enumeration.

The heat transfer diagram shows the degradation of heat from the heating utilities to the environment through heat exchanges. Each curve represents the flow rate of cascaded heat through a heat exchanger. This diagram shows that to save heat implies bridging a heat outlet to a heating utility user through a set of matches between suppliers and receptors; consequently, for a given set of streams only bridges can lead to energy savings. Heat savings result in a down-translation of the total HEN curve.

Evaluation of the heat savings capacity of a bridge is a small Linear Programming problem. The final topology can be identified by engineering analysis or optimisation. A network table, which fits the transportation model, has been proposed for an easy evaluation of heat savings capacity of a bridge, exchange surface area, and identification of the final HEN topology. Identification of the final HEN topology by optimization implies the use of binary variables. A MILP formulation based on the transportation model can be used. The decision variables are limited to those related to the bridge modifications.

A global procedure of bridge analysis for HEN retrofit and case studies are presented in the second part of the paper.

8. References

1. Tjoe, T.N., Linnhof, B., Using pinch technology for process retrofit, *Chemical Engineering* 93, 47-60 (1986).
2. Linnhof March, Introduction to Pinch Technology, Linnhof March, UL (1998).
3. Linnhof, B., Townsend, D.W., Boland, D., A User Guide to Process Integration for the Efficient Use of Energy, 1st ed., Institute of Chemical Engineers (1982).
4. Kemp, I.C., Pinch Analysis and Process Integration: A User's Guide to Process Integration for the Efficient Use of Energy, Butterworth-Heinemann Oxford (2007).
5. Klemes, J., Friedler, F., Bulatov, I., Varbanov, P., Sustainability in the Process Industries: Integration and Optimization, McGraw-Hill, New York (2011).
6. Nordman, R., Berntsson, T., Use of advanced composite curves for assessing cost-effective HEN retrofit: I: Theory and concepts, *Applied Thermal Engineering* 29, 275-291 (2009).
7. Nordman, R., Berntsson, T., Design of Kraft pulp mill hot water system—A new method that maximizes excess heat, *Applied Thermal Engineering* 26, 363 (2006).
8. Carlsson, A., Franck, P., Berntsson, T., Design better heat exchanger network retrofits, *Chemical Engineering Progress* 89, 87-96 (1993).
9. van Reisen, J.L.B., Grievink, J., Polley, G.T., Verheijen, P.J.T., The placement of two-stream and multi-stream heat exchangers in an existing network through path analysis, *Comput. Chem. Engineering* 19, S143-S148 (1995).
10. van Reisen, J.L.B., Polley, G.T., Verheijen, P.J.T., Structural targeting for heat integration retrofit, *Applied Thermal Engineering*, 18(5): p. 283-294 (1998).
11. Ciric, A.R., Floudas, C.A., A retrofit approach for heat exchanger networks, *Computers and Chemical Engineering* 13, 703-715 (1989).
12. Ciric, A.R., Floudas, C.A., A mixed integer nonlinear programming model for retrofitting heat exchanger networks, *Ind. Eng. Chem. Res.* 29, 239-251 (1990).
13. Yee, T.F., Grossmann, I.E., A screening optimization approach for the retrofit of heat exchanger networks, *Ind. Eng. Chem. Res.* 30, 146-162 (1991).
14. Asante, N.D.K., Zhu, X.X., An automated and interactive approach for heat exchanger network retrofit, *Transactions of the IChemE* 75, 349-360 (1997).
15. Asante, N.D.K., Zhu, X.X., An automated and interactive approach for heat exchanger network retrofit, *Transactions, Institute of Chemical Engineers* 75, 349-360 (1997).
16. Zhu, X.X., Asante, N.D.K., Diagnosis and optimization approach for heat exchanger network retrofit, *AIChE J.* 45, 1488-1503 (1999).
17. Varbanov, P.S., Klemes, J., Rules for path construction for HEN debottlenecking, *Applied Thermal Engineering* 20, 1409-1420 (2000).

18. Furman, K.C., Sahinidis, N.V., Computational complexity of heat exchanger network synthesis, *Comp. Chem. Eng.* 25, 1371–1390 (2001).
19. Athier, G., Floquet, P., Pibouleau, L., Domenech, S. (1998). A mixed method for retrofitting heat exchanger networks, *Comp. Chem. Eng.* 22, 505-511 (1998).
20. Bochenek, R., Jezowski, J.M., Genetic algorithm approach for retrofitting heat exchanger network with standard heat exchangers. In *16th European Symposium on Computer-Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering* (pp. 871–876) (2006).
21. Jezowski, J.M., Bochenek, R., Poplewski, G. (2007). On application of stochastic optimization techniques to designing heat exchanger and water networks, *Chem. Eng. Proc.*, article in press.
22. Rezaei, E., Shafiei, S., Heat exchanger network retrofit by coupling genetic algorithm with NLP and ILP methods, *Computers and Chemical Engineering* 33, 1451-1459 (2009).
23. Pettersson, F., Synthesis of large-scale heat exchanger networks using a sequential match reduction approach, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 29, Issue 5, 15 April 2005, Pages 993–1007
24. Barbaro, A., Bagajewicz, M. J., New rigorous one-step MILP formulation for heat exchanger network synthesis, *Computers and Chemical Engineering* 29 (2005) 1945–1976.

Annex

Linear transportation formulation to evaluate the heat savings capacity of a bridge

In order to formulate the linear transportation model, the following sets are defined:

- $I = \{i | i \text{ is a supplier of a heat source}\}$
- $K = \{k | k \text{ is a receptor of a heat demand}\}$
- $J = \{j | j \text{ is a temperature interval in } i \in I\}$
- $L = \{l | l \text{ is a temperature interval in } k \in K\}$
- $B = \{(i, k) | (i, k) \text{ is a match involved in the bridge}\}$
- $N = \{(i, j, k, l) | (i, j, k, l) \text{ is a non - feasible heat transfer area}\}$

The variables are the following:

- $q_{i,j,k,l}$ Heat transferred from supplier i in its temperature interval j to receptor k in its temperature interval l
- $q_{hu,k,l}$ Heat transferred from a hot utility to receptor k in its temperature interval l
- $q_{i,j,cu}$ Heat transferred from supplier i in its temperature interval j to a cold utility

- $Q_{i,j}$ Available heat in supplier i in its temperature interval j
- $Q_{k,l}$ Required heat by receptor k in its temperature interval l

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} q_{hu,k,l} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$Q_{i,j} = \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} q_{i,j,k,l} + q_{i,j,cu} \quad \forall i \in I, j \in J \quad \text{Eq. (2)}$$

$$Q_{k,l} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{i,j,k,l} + q_{hu,k,l} \quad \forall k \in K, l \in L \quad \text{Eq. (3)}$$

$$q_{i,j,k,l} = q_{i,j,k,l}^0 \quad \forall (i, k) \notin B \quad \text{Eq. (4)}$$

$$q_{i,j,k,l} = 0 \quad \forall (i, j, k, l) \in N \quad \text{Eq. (5)}$$

$$q_{i,j,k,l} \geq 0 ; \quad q_{i,j,cu} \geq 0 ; \quad q_{hu,k,l} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, l \in L \quad \text{Eq. (6)}$$

The objective function in equation (1) is stated as the total heat consumption. Equations (2) and (3) represent the energy balance in each temperature interval of each supplier i and receptor k . Equation (4) states that heat transfer $q_{i,j,k,l}$ is equal to its initial value if match (i, k) is not involved in the bridge. Equations (5) and (6) mean that non-feasible heat transfers are null, and that all the variables are positive, respectively.

The LP problem to evaluate the heat savings capacity of a bridge can easily be solved with Excel solver by using the format of second-decomposition table, where the variables and constraints are explicit (see example in tables 7 and 8).

ANNEXE 2

Article

Titre: Bridge Analysis to Reduce the Industrial Energy Requirements by Heat Exchanger Network Retrofit: Part 2 – Applications

Auteurs : J.-C. Bonhivers, S. Bala, A. Alva-Argaez et P. R. Stuart

Journal : soumis à *Energy*.

Bridge Analysis to Reduce the Industrial Energy Requirements by Heat-Exchanger Network Retrofit: Part 2 - Applications

Jean-Christophe Bonhivers*, Srinivasan Bala*, Alberto Alva-Argaez **, Paul R. Stuart*

* NSERC Chair in Design Engineering, Department of Chemical Engineering, Ecole Polytechnique de Montreal, P.O. Box 6079, Station Centre-Ville, Montreal, Quebec H3C 3A7, CANADA

E-mail : paul.stuart@polymtl.ca

** Process Ecology Inc., Suite 930, 105-150 Crowfoot Cres. NW, Calgary, Alberta. T3G 3T2, CANADA

Abstract

To reduce the hot utility consumption in an existing heat exchanger network (HEN) implies identifying modifications that reduce the flow rate of heat transferred from the heating utility to the environment and through the network; consequently a bridge between a heat outlet and a hot utility user through a set of matches is necessary to achieve heat savings. The following concepts supporting a method for HEN retrofit have been presented in the first part of this paper: the fundamental sets of modifications necessary to reduce the heat consumption which are termed “bridges”, a method to enumerate the bridges, a diagram on which all the bridges are visualized, and a network table for easy evaluation of these. In this second part, a global procedure for HEN retrofit is described. The method is then applied to three examples. For each example the heat degradation diagram, the network table, the bridges, and the network topology corresponding to some of these are presented. The significant reduction of search space resulting from bridge identification is evaluated in the discussion of the results.

Key words: energy integration, retrofit, heat-exchanger network

1. Introduction

The energy analysis of an existing industrial site includes the study of the utility system, the identification and evaluation of heat-saving modifications in the heat exchanger network (HEN) or the process, and the selection of the most promising modifications. The first step involves identifying utility constraints, evaluating the boiler and turbine efficiencies and the cost of fuel and electricity as a function of process heat demand. If the analysis shows that a reduction of heat consumption by HEN retrofit can result in increased profitability, data about the network are extracted. It includes the evaluation of mass and energy balances, stream flow rates, heat capacities, initial and target temperatures, and heat transfer coefficients, the identification of practical constraints for new connections, and a model of investment costs. Then, heat-saving modifications are identified by checking a list of key points, or using insight-based approaches or numerical optimization methods. The last step is the selection of modifications according to criteria of profitability and operability.

Methods for HEN retrofit have been reviewed in the first part of the paper. Optimization models for HEN retrofit are highly complex and do not guarantee global optimality. Consequently approaches based on pinch analysis are the most widely used. However difficulties in data extraction, practical targeting and redesign of the network are still encountered, especially in situations of retrofit and for networks involving non-isothermal mixing.

To reduce the heat consumption at the heating utility level implies reducing the flow rate of heat transferred from the heating utility, through the existing heat exchanges and ultimately rejected to the environment. This progressive transfer of heat in the existing heat exchanges is not explicitly analyzed in the present methods for HEN retrofit. This paper presents a method to reduce the heat consumption based on this analysis.

The following has been presented in the first part of the paper:

- The fundamental set of modifications necessary to save energy, which is made explicit and termed a bridge.
- A method to enumerate the bridges.
- A heat degradation diagram to visualize all the bridges.
- A network table to easily evaluate them

This second part presents a global procedure for HEN retrofit, applications to three examples, and a discussion of the results.

2. Steps of bridge analysis

To reduce energy consumption implies reducing the flow rate of heat transferred from the heating utility to the environment through heat exchangers, i.e. bridging heat outlets to hot utility users through process stream matches. Bridges are fundamental sets of matches that result in heat savings. In the following procedure, bridges are enumerated by increasing number of matches and characterized. Steps 3 to 6 are specific to bridge analysis; the other steps are common to other approaches.

Steps:

1. Analysis of the utility system
2. Extraction of data about existing HEN
3. Construction of heat degradation diagram
4. Construction of network table
5. Identification and characterization of bridges
6. Identification of topology for promising bridges and detailed evaluation
7. Selection of the final solution

Comments

Step 1 involves a diagnostic about possible advantages from HEN retrofit. It may also include the development of a cost model of the energy system. Data extraction at step 2 involves the identification of process heat sources, process heat demands, existing suppliers and receptors, heat loads, and inlet and outlet temperatures. A grid diagram is often used to display data about the existing HEN. Evaluation of heat transfer coefficients and price of exchange surface area is necessary for the economic analysis. The heat degradation diagram and network table are convenient tools which are proposed for steps 3 and 4. The heat degradation diagram provides an overall view about heat bridges. The use of the network table is convenient to present the set of potential matches, to characterize bridges, and to identify the final network topology. Identification of bridges in step 5 involves excluding the useless matches from the set (only matches included in relevant prime bridges are selected), respecting the bridge conditions to identify composite bridges, and excluding useless bridges from the enumeration. Composite bridges are identified by adding a minimum number of matches to “useful” bridges with respect to bridge conditions. If the addition of matches increases the heat savings, then the resulting bridge is considered as useful. No match is added to useless bridges. The bridge identification step has been described in detail in the first part of the paper. Bridge characteristics directly available from the network table include the number of new matches, number of new connections between streams, number of eliminated heat exchangers, heat savings capacity, and estimated exchange surface area. At step 6, the HEN topology resulting from bridge modifications is identified by engineering analysis or optimization. In the latter case, a MILP problem based on the transportation model [1, 2] or a MINLP based on a superstructure can be used. The decision variables are limited to those related to bridge modifications. If optimization is used, the topology can also be identified directly at step 5. In the final step, beside direct

profitability, the selected solution should also satisfy operability criteria, e.g. flexibility, controllability, reliability, safety, and easy start-up and shut-down.

3. Examples

Three examples are analyzed hereafter to illustrate the approach. It is assumed that the utility system does not limit the heat savings capacity and the HEN data have already been extracted. Steps 3 to 6 of the procedure will be presented. These involve the construction of the heat degradation diagram and network table, and the identification of bridges as well as the resulting HEN topology.

3.1. Example 1

The network before retrofit corresponds to the example described in the first part of the paper; it includes one cooler, two internal heat exchangers, and one heater; any match is allowed. On the x-y grid diagram shown on Figure 1, suppliers and receptors are sorted according their hot end temperature. As a consequence, a crossing exchanger on the diagram corresponds to a criss-cross transfer. This is the case with heat exchanger E_2 .

The corresponding heat degradation diagram is shown on Figure 2a. Without taking into account any connection constraints, the heat savings capacity is equal to 1300kW. On Figure 2b, all the suppliers have been shifted along the temperature axis by minus 10°C to take into account a constraint of a temperature difference greater than 10°C in each match. In this case, the maximum heat savings are equal to 1100kW. Main prime bridges $\{c_1^s e_1^r, e_1^s h_1^r\}$ and $\{c_1^s e_2^r, e_2^s h_1^r\}$ are indicated.

Table 1 shows the identified set of potential matches. Match $e_1^s e_2^r$ which would lead to a new criss-cross exchange is not included in any relevant prime bridge, and has been excluded from the set.

Table 2 lists the bridge structures that include a maximum of four matches, with their characteristics. Bridge $\{c_1^s e_1^r, c_1^s e_2^r, e_1^s h_1^r, e_2^s h_1^r\}$ results in maximum heat savings. It implies modifications in E_1 and E_2 , and the addition of two other heat exchangers, i.e. a complete transformation of the network. In fact the retrofitted network corresponds to the result that would be achieved by the grass roots pinch design method. The resulting HEN topology is shown on Figure 3. The corresponding heat degradation diagram is presented on Figure 2c; the total heat flow rate curve has been lowered by 1100kW, which is equal to the maximum heat savings. Remember that no target is used in our approach; bridges are just enumerated. Bridge $\{c_1^s e_2^r, c_1^s h_1^r, e_2^s h_1^r\}$ results in the second greatest heat savings, and implies the addition of only one exchanger and no modification of heat exchanger E_1 . Due to the tradeoff between capital and operating costs, this bridge can be preferred to the previous. The corresponding HEN topology is presented in Table 3 and on Figure 4. The corresponding heat degradation diagram is shown on Figure 4c of the first part of the paper.

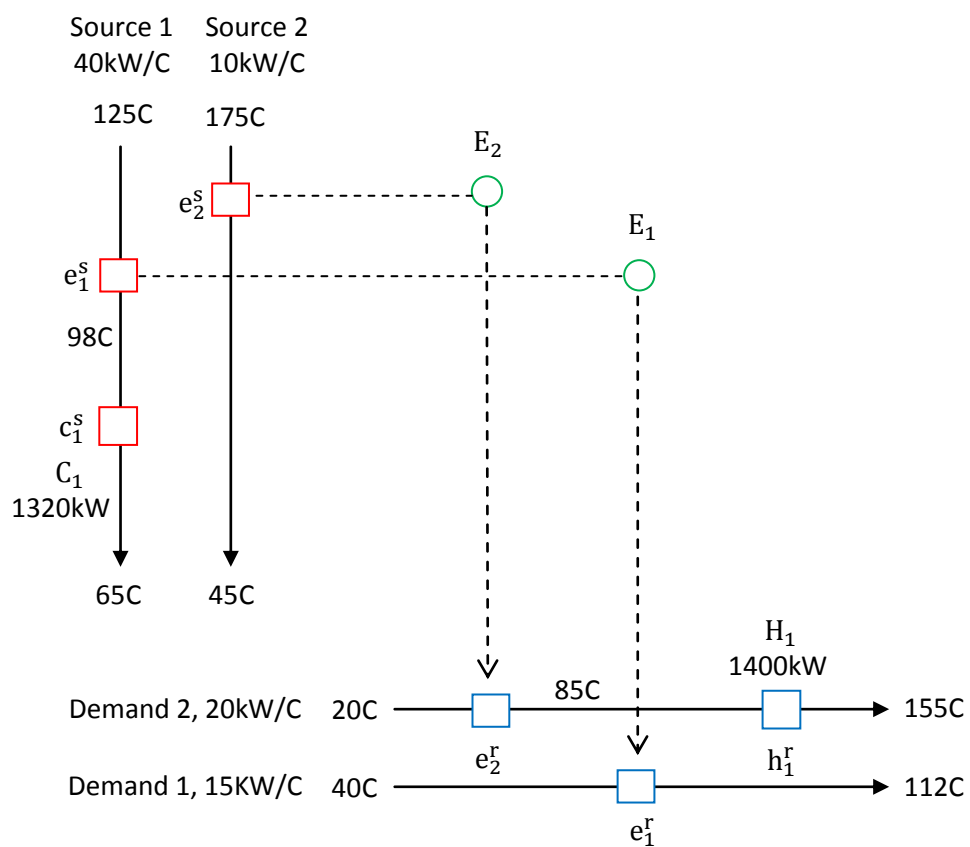


Figure 1 Network of example 1 before retrofit

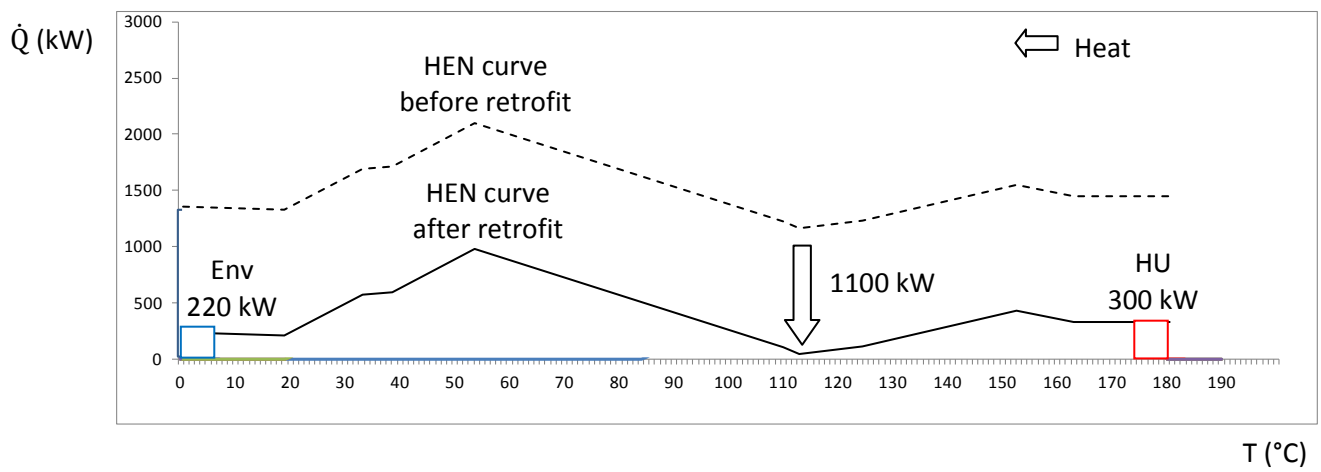
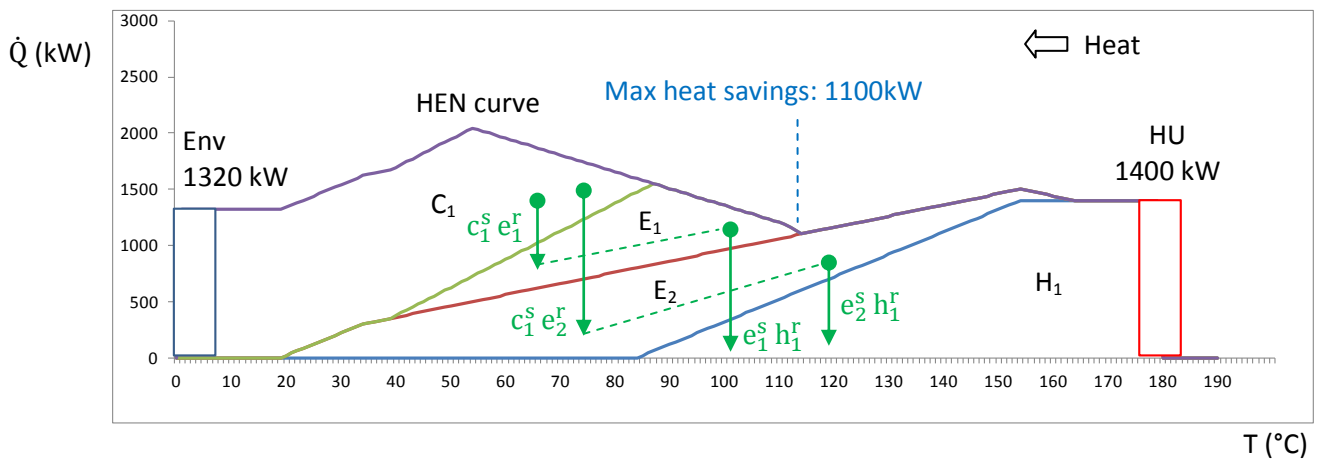
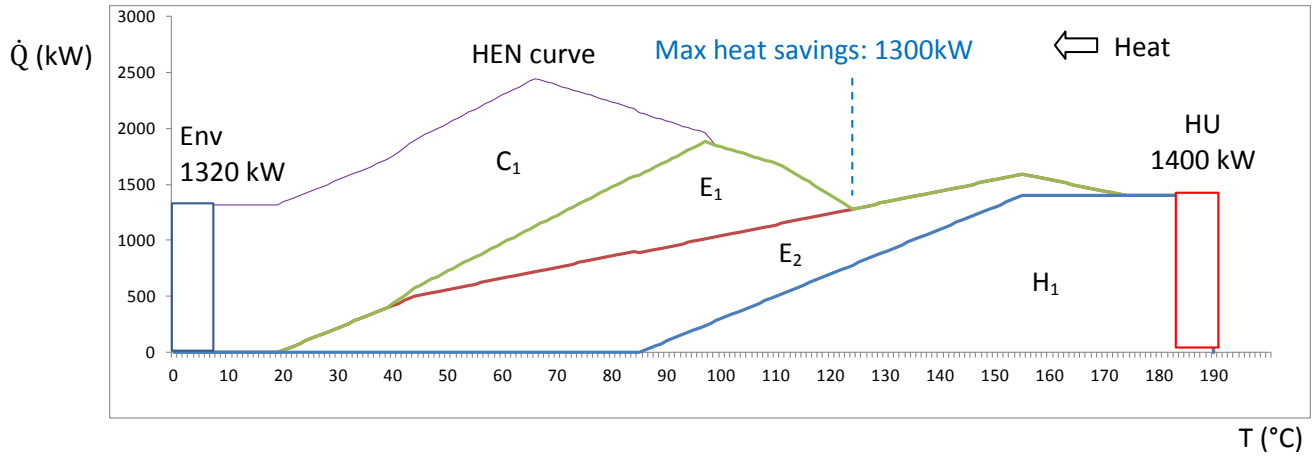


Table 1 Transfer capacity of potential matches for example 1 (kW)

source 2	e_2^s				1300	(800)
source 1	e_1^s			1080	(1080)	(600)
	c_1^s	1320		(720)	(1300)	(60)
HU		Savings			1400	
CU			e_1^r	e_2^r	h_1^r	
			demand 1	demand 2		

Table 2 Bridges for example 1, $m \leq 4$

m	bridge	savings (kW)	new streams connections	removed exchangers	comments
1	$\{c_1^s h_1^r\}$	60	1	0	prime
2	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s h_1^r\}$	600	1	0	prime
2	$\{c_1^s e_2^r, e_2^s h_1^r\}$	800	1	0	prime
3	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_2^r, e_2^s h_1^r\}$	720	1	0	prime
3	$\{c_1^s e_1^r, c_1^s h_1^r, e_1^s h_1^r\}$	600	1	0	composite, useless
3	$\{c_1^s e_2^r, c_1^s h_1^r, e_2^s h_1^r\}$	830	1	0	composite, useful
4	$\{c_1^s e_1^r, c_1^s h_1^r, e_1^s e_2^r, e_2^s h_1^r\}$	780	1	0	composite, useful
4	$\{c_1^s e_1^r, c_1^s e_2^r, e_1^s e_2^r, e_2^s h_1^r\}$	800	1	0	composite, useless
4	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_2^r, e_1^s h_1^r, e_2^s h_1^r\}$	720	1	0	composite, useless
4	$\{c_1^s e_1^r, c_1^s e_2^r, e_1^s h_1^r, e_2^s h_1^r\}$	1100	1	0	composite, useful
Maximum heat saving: 1100 kW					

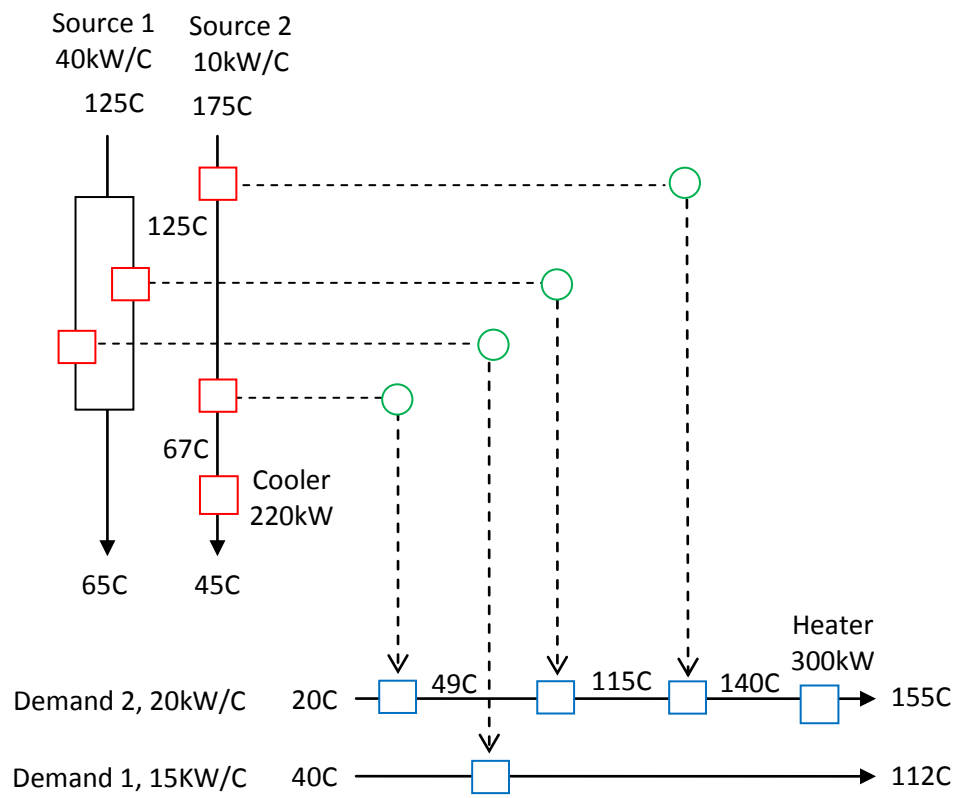


Figure 3 Network resulting from bridge $\{c_1^s e_1^r, c_1^s e_2^r, e_1^s h_1^r, e_2^s h_1^r\}$ which leads to minimum heat consumption

3.2. Example 2

The initial heat exchanger network is shown on **Figure 5**; it includes three process sources, three process demands, and seven heat exchanger units. Any match is allowed.

The corresponding heat degradation diagram is shown on **Figure 6a**. Without taking into account any constraints, the maximum heat savings are equal to 360kW. On **Figure 6b**, all the suppliers have been shifted along the temperature axis by minus 10°C to take into account a constraint of a temperature difference at least 10°C in each match. The maximum heat savings are still equal to 360kW. Main bridge $\{c_2^s e_4^r, e_4^s h_1^r\}$ is indicated. Notice that E_4 is a criss-cross heat exchanger in the initial network.

Table 4 shows the set of potential matches. Matches that lead to new criss-cross exchanges have been excluded.

Table 5 lists the bridge structures that include maximum three matches, with their characteristics.

Bridge $\{c_2^s e_4^r, e_4^s h_1^r\}$ results in maximum heat savings and minimum number of modifications. The resulting heat degradation diagram is shown on **Figure 6c**; the total heat flow rate curve has been lowered by 360kW.

A HEN retrofit program may include a bridge to achieve heat savings, and a network rearrangement to reduce the investment cost. **Table 6a** shows the existence of a loop between source2-demand2-source3-demand3 which results from bridge $\{c_2^s e_4^r, e_4^s h_1^r\}$. Arrows indicate how to remove the loop. The final result is presented in **Table 6b** and on a grid diagram on **Figure 7**.

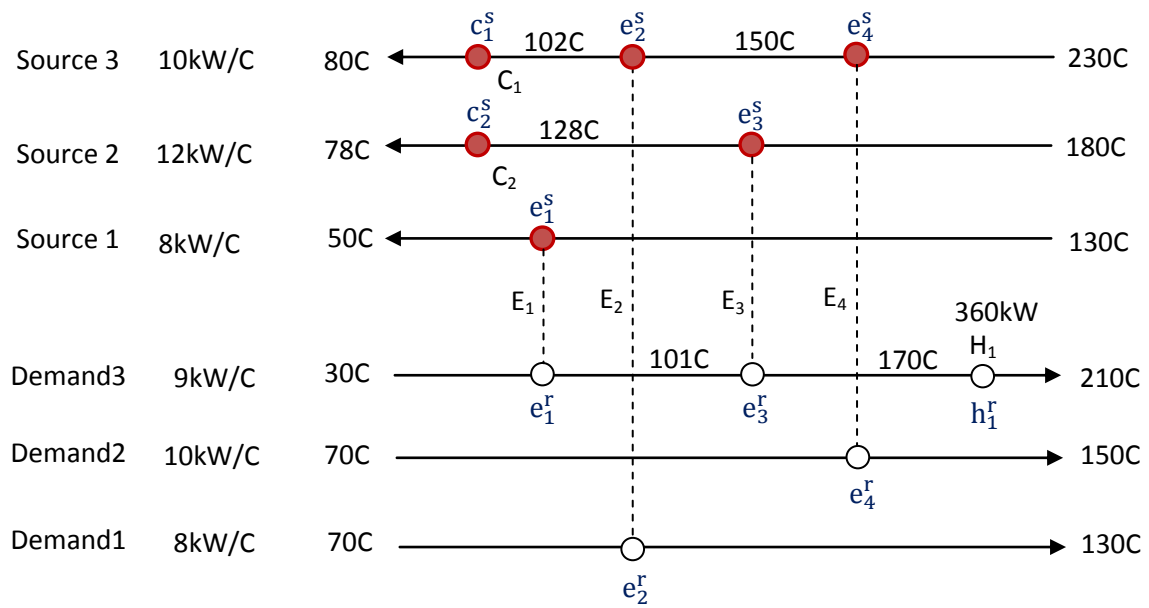


Figure 5 Initial network of example 2

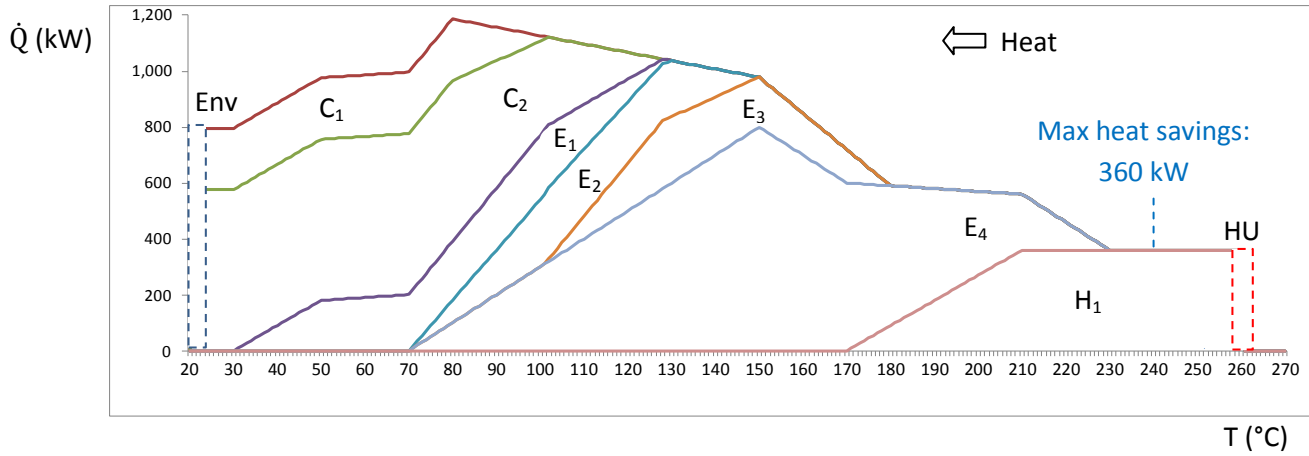


Figure 6a Initial network - No shift of supplier temperature

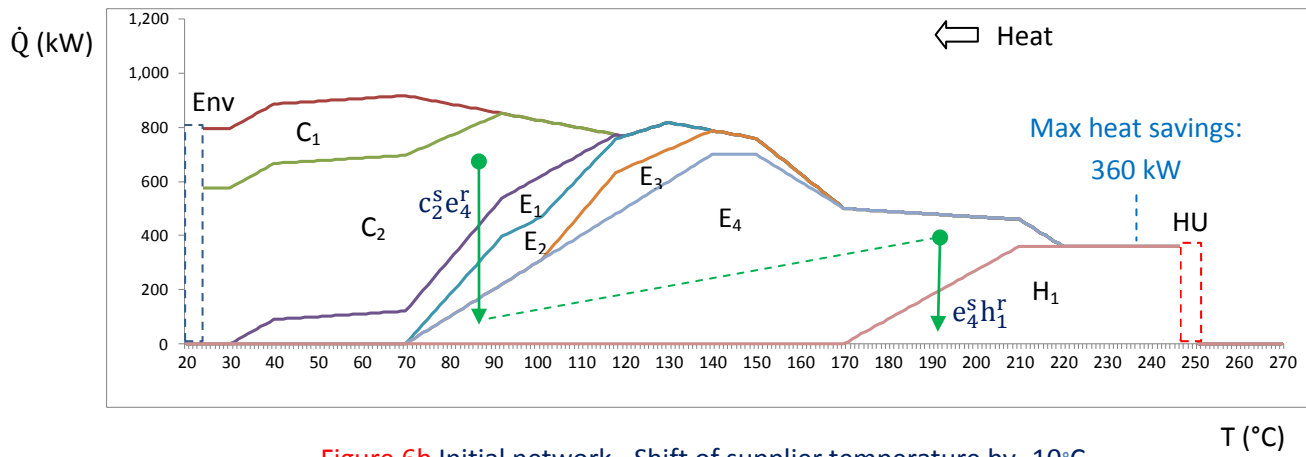


Figure 6b Initial network - Shift of supplier temperature by -10°C
Arrows show main bridge $\{c_2^s, e_4^r, e_4^s, h_1^r\}$.

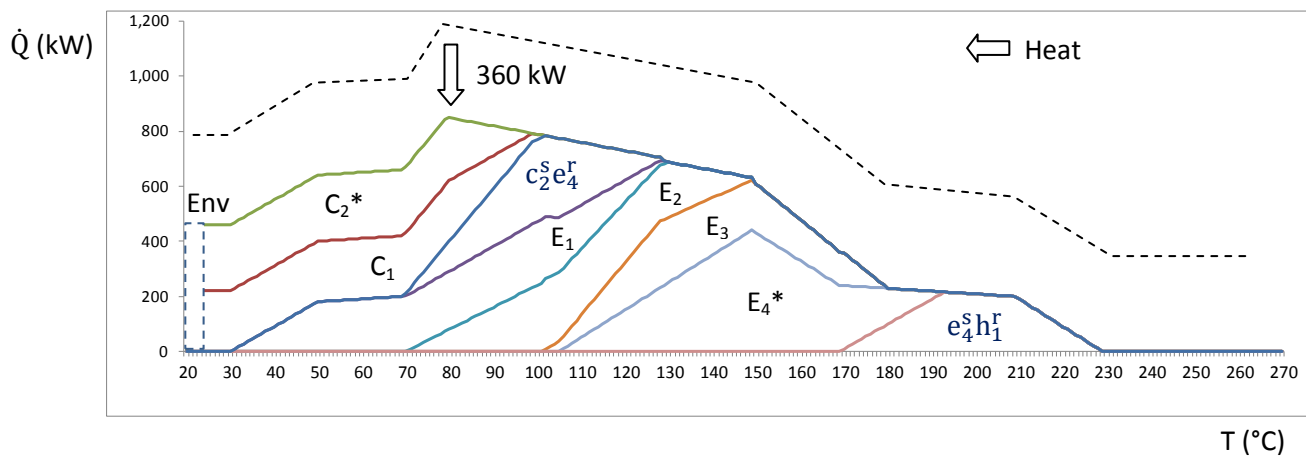


Figure 6c Network after bridge modifications $\{c_2^s, e_4^r, e_4^s, h_1^r\}$ - No shift of supplier temperature

Table 6a Network resulting from bridge $\{c_2^s e_4^r, e_4^s h_1^r\}$
Arrows show modifications to remove a loop - Values in kW

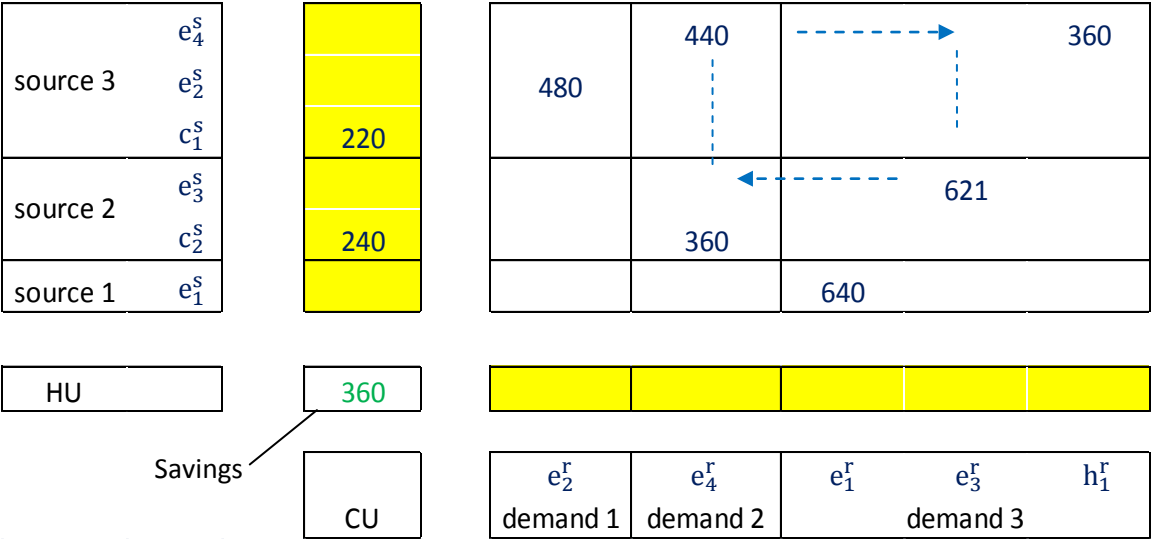
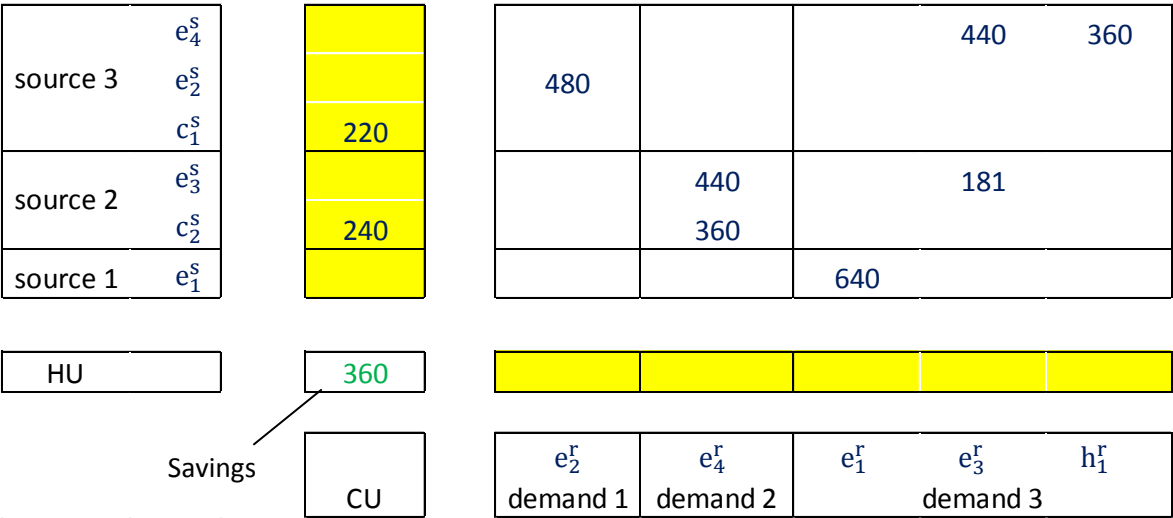


Table 6b Network after loop removal



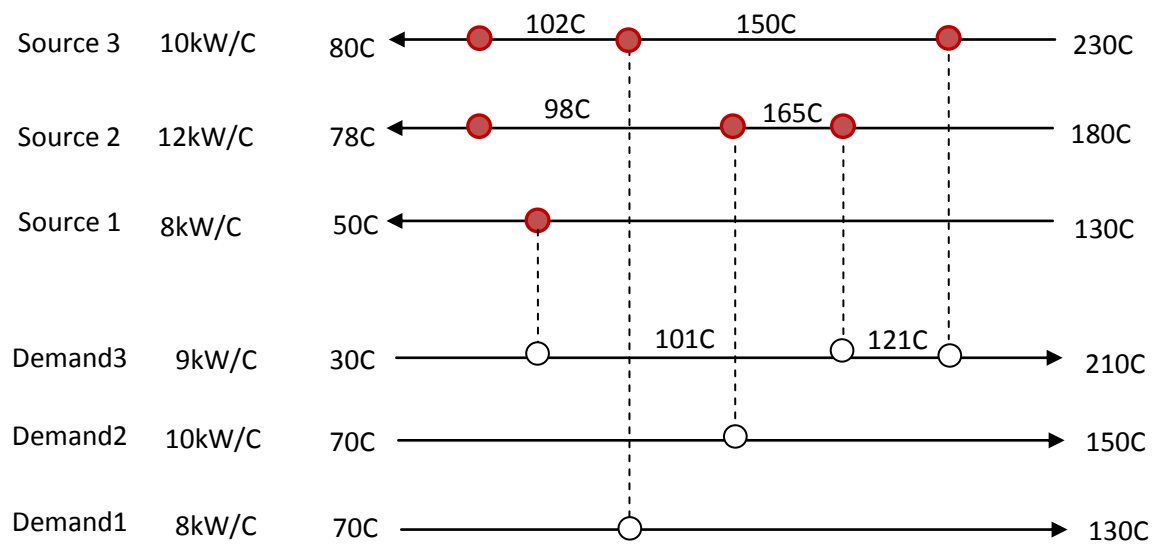


Figure 7 Network after bridge modification and loop removal

3.3. Example 3: a Kraft pulp mill

In this example the heat exchanger network of a kraft pulp mill is analyzed. The HEN data come from Carlsson et al (1993). This network involves 6 process heat demands, 9 process heat sources, and 15 heat exchanger units. The corresponding grid diagram is presented on Figure 8.

Figure 9 shows the heat degradation diagram corresponding to the network before retrofit. Receptor and supplier temperatures are not shifted. Main bridges are indicated with arrows. The arrow corresponding to match $e_7^s h_5^r$ is dashed because although the match has great heat transfer capacity, it is also expensive. In practice the heat savings capacity is less than the minimum value of the HEN curve, due to connection constraints.

Table 7 presents the streams connections with practical feasibility. Only connections requiring fixed investment cost lower than 170000 US\$ have been assumed feasible in practice. The temperature difference should be greater than 10°C in any new connection.

Table 8 shows the set of potential matches. The set of potential matches is the union of prime bridges that include a maximum of 3 matches with practical feasibility and result in more than 300kW heat savings (3% of the initial consumption). Given this set, the maximum heat saving is equal to 5100kW.

Table 9 lists the bridge structures that include a maximum of 3 matches. The solutions identified by Carlsson et al (1993) and Asante et al. (1997) only include some of these prime bridges, plus others with a savings capacity less than 300 kW. The maximum heat savings can be achieved with a bridge including 6 matches, which is indicated in Table 9. In fact, all the prime bridges correspond to possible projects already known in the kraft pulp industry. The innovative part is the methodological approach. The proposed method has directly identified all the heat savings possibilities, given this data extraction.

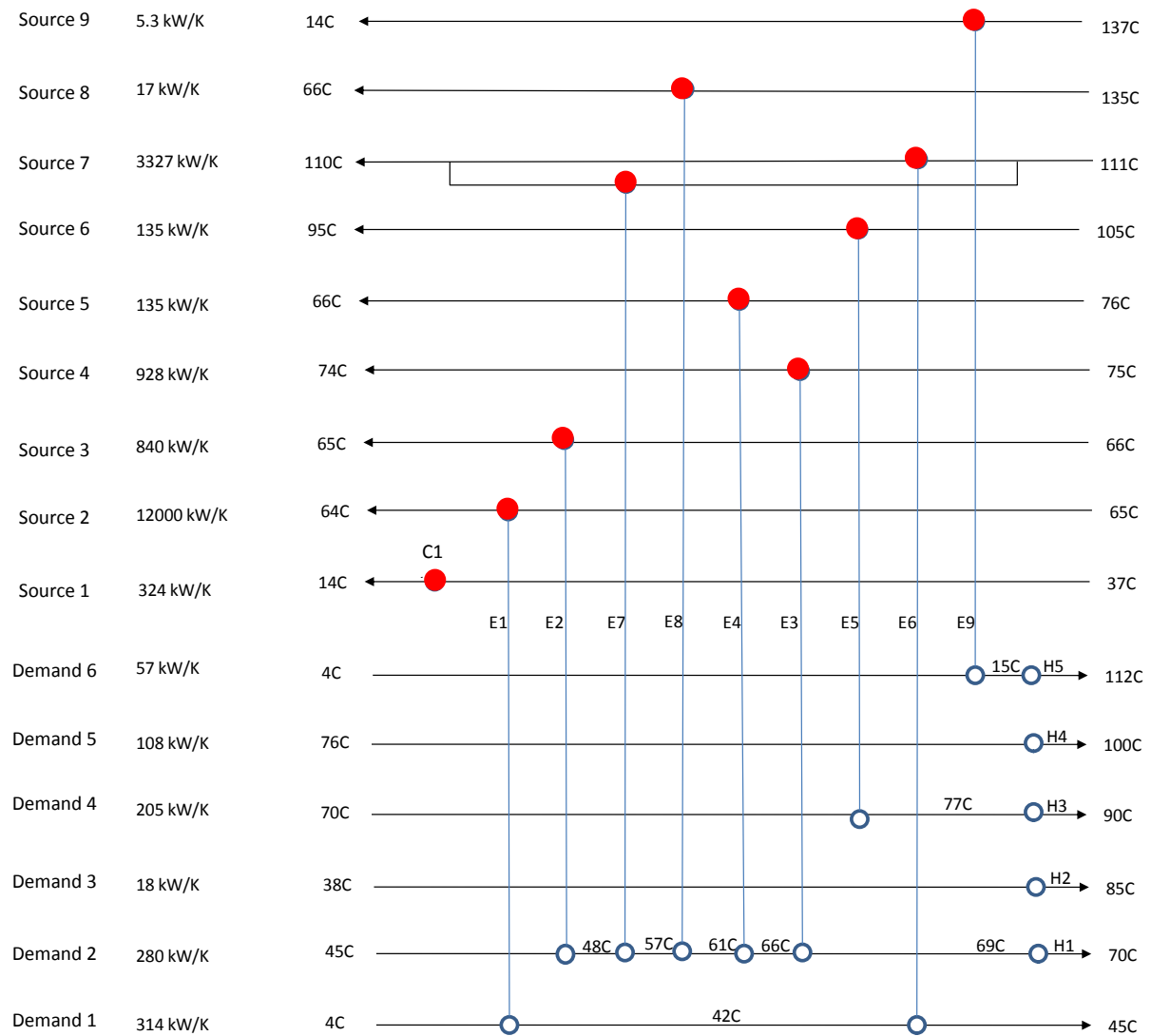


Figure 8 Initial network of example 3

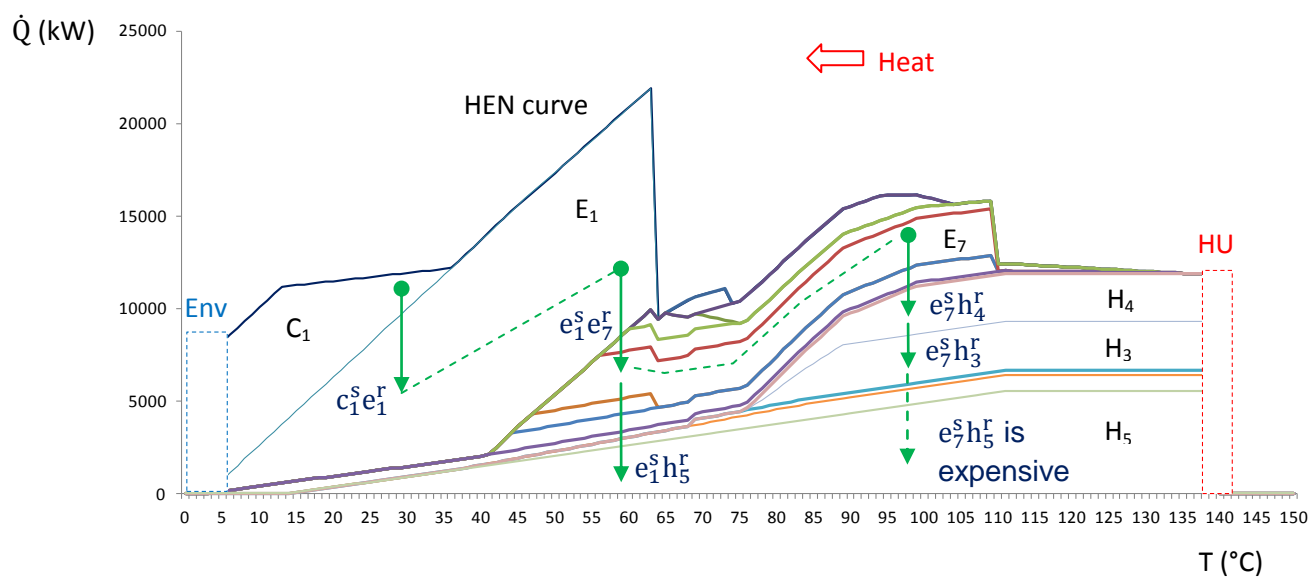


Figure 9 Heat degradation diagram of example 3

Table 7 Practical feasibility of connections for example 3

source 9	y	y	y	n	y	y
source 8	y	y	n	y	y	n
source 7	y	y	n	y	y	n
source 6	y	y	y	y	y	n
source 5	y	y	y	n	y	y
source 4	y	y	y	y	y	y
source 3	y	y	y	y	y	y
source 2	y	y	y	y	y	y
source 1	y	y	n	y	n	n
	demand 1	demand 2	demand 3	demand 4	demand 5	demand 6

Table 8 Transfer capacity of potential matches for example 3 (kW)

source 9 e_9^s				(498)			651	(594)
source 8 e_8^s								
source 7 e_7^s						(2520)	(2520)	
e_6^s						(942)	(942)	
source 6 e_5^s								
source 5 e_4^s								
source 4 e_3^s								
source 3 e_2^s				840	(423)			(840)
source 2 e_1^s				12000 (942)	(840) (1960)	(405)		(651) (2264)
source 1 c_1^s	7,452			(7222)				

hu	savings							865		2,665	2,594		5,490
----	---------	--	--	--	--	--	--	-----	--	-------	-------	--	-------

cu	e_1^r	e_6^r	e_2^r	e_7^r	e_8^r	e_4^r	e_3^r	h_1^r	h_2^r	e_5^r	h_3^r	h_4^r	e_9^r	h_5^r
	demand 1								demand 3	demand 4		demand 5		demand 6

Table 9 Bridges with $m \leq 3$ for example 3

m	Bridge	Savings (kW)	New streams connections	Removed exchangers	Comments
2	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s h_2^r\}$	405	2	0	prime
2	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s h_5^r\}$	2264	2	0	prime
3	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_2^r, e_2^s h_2^r\}$	423	3	0	prime
3	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_2^r, e_2^s h_5^r\}$	840	3	1	prime
3	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_6^r, e_6^s h_3^r\}$	942	2	1	prime
3	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_6^r, e_6^s h_4^r\}$	942	2	1	prime
3	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_7^r, e_7^s h_3^r\}$	1960	3	0	prime
3	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_7^r, e_7^s h_4^r\}$	1960	3	0	prime
3	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_9^r, e_9^s h_2^r\}$	498	3	0	prime
3	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_9^r, e_9^s h_5^r\}$	594	2	0	prime
3	$\{c_1^s e_1^r, e_1^s h_2^r, e_1^s h_5^r\}$	2669	3	0	composite, useful
Maximum heat saving: 5100 kW					
Bridge with maximum savings: $\{c_1^s e_1^r, e_1^s e_6^r, e_1^s e_7^r, e_1^s h_5^r, e_6^s h_4^r, e_7^s h_3^r\}$					

4. Discussion of results

A bridge is the heat savings part of a HEN retrofit program. An eventual network rearrangement to reduce the investment cost, which is limited to the streams implied in the bridge, can be identified by engineering analysis or optimization.

A simple characterization of bridges is fast and direct; the estimation of heat savings capacity corresponds to a Linear Programming problem. Three screenings are proposed to enumerate the bridges: the exclusion of useless matches from the set, the application of bridge conditions and the exclusion of useless bridges from the enumeration. These are discussed hereafter.

Screening 1: Exclusion of useless matches from the set

The set of potential matches is obtained by the union of relevant prime bridges. Matches without practical feasibility and/or heat transfer capacity, and resulting in exergy loss (new criss-cross transfer) have been excluded. In certain situations some matches resulting in exergy loss could however be accepted (see considerations in the first part of the paper). Finally all the matches that cannot be included in relevant prime bridge have been excluded. The first screening resulted in an important reduction in the number of relevant prime bridges (≤ 10) in the three examples. As a consequence, all the bridge structures could have even been identified by a simple evaluation of all the combinations of prime bridges ($\leq 2^{10}$). However much less operations are necessary if composite bridges are constructed by addition of matches by following bridge conditions and if useless bridges are excluded from the enumeration.

Screening 2: Addition of matches through the application of bridge conditions

Composite bridges are identified by adding matches to bridges by following the bridge conditions. This principle reduces the number of operations necessary to enumerate the bridges. Table 12 includes data on the benefit of this screening.

Screening 3: Exclusion of useless bridges from the enumeration

This principle involves identifying new bridges by only adding a minimum number of matches to “useful” bridges; the resulting bridge is useful if the heat savings capacity strictly increases. “Adding a minimum number of matches” means that all the added matches are necessary to follow bridge conditions (a removal of any added match would result in a set that does not respect the bridge conditions). This screening is especially efficient if the set of potential matches includes many matches, which is not the case in our examples.

Benefit from screenings 1 and 2 on the search space

The number of possible combinations of m matches among a set including A matches, N_m^A , follows the relation:

$$N_m^A = \frac{A!}{(A-m)! \cdot m!} \quad (1)$$

The number of possible new matches before the first screening, which limits the potential matches to the union of relevant prime bridges, is equal to:

$$A = c - e - 1 \quad (2)$$

c: number of cells in first-decomposition table (total number of possible matches)

e: number of existing exchanger units

Notice that the last term of equation 2 is due to the exclusion of a match between the heating and cooling utilities. In example 1, $A = 16 - 4 - 1 = 11$. The initial network includes 11 possible new matches between suppliers and receptors. Consequently there are 11 possible combinations of 1 new match ($N_1^{11} = 11$), 55 possible combinations of 2 new matches ($N_2^{11} = 55$), etc.

Table 10 presents the benefits from the two first screenings on the search space. It compares the number of possible combinations N_m^A to the number of bridge structures B_m with or without the exclusion of useless matches. Both screenings reduce the search space. Notice that the benefit from the third screening, which excludes the useless composite bridges from the enumeration, is not considered here.

Table 10 Benefit from the two first screenings (identification of the potential matches and addition of matches with respect to bridge conditions) on the search space

Example	Matches, m	Set including all the matches			Set after exclusion of useless matches		
		Set, A	Combinations, N_m^A	Bridge structures, B_m	Set, A	Combinations, N_m^A	Bridge structures, B_m
1	1	11	11	1	6	6	1
	2		55	2		15	2
	3		165	4		20	3
	4		330	10		15	4
2	1	34	34	2	11	11	0
	2		561	9		55	2
	3		5 984	44		165	6
	4		46 376	172		330	12
3	1	149	149	5	15	15	0
	2		11 026	45		105	2
	3		540 274	685		455	9
	4		19 720 001	8 645		1365	20
	5		571 880 029	59 083		3003	40

5. Conclusion

The following has been presented in this paper:

- The fundamental set of modifications necessary to save energy, which is termed a “bridge”.
- A method to enumerate the bridges.
- A heat degradation diagram to visualize all the bridges
- A network table to easily evaluate them
- A procedure for HEN retrofit
- The application on three examples

Only a bridge can lead to heat savings. The basic modifications to reduce the heat consumption being made explicit, we can enumerate the modifications necessary to reduce the flow rate of heat transferred from the heating utility to the environment.

Three screenings are proposed to enumerate the bridges: the exclusion of useless matches, the addition of matches as dictated by bridge conditions and the exclusion of useless bridges from the enumeration. A characterization of bridges is simple and direct. More information about the topology of the network resulting from bridge modifications is necessary for detailed evaluation of profitability. This information can be provided by engineering analysis or optimization.

The heat degradation diagram shows the flow rate of heat down-cascaded from the heating utility to the environment through each heat exchanger. To save heat implies reducing the flow rate of transferred heat in the entire range between the heating utility and the environment by modifications in the initial network. All the bridges are visualized on this diagram.

A table is proposed to display data on the network, and to easily evaluate modifications and identify the network topology.

An approach for HEN retrofit and its application to three examples have been presented. A bridge is necessary to achieve heat savings. Beside a bridge, a network rearrangement which would be limited to the streams implied in the bridge may also be necessary to reduce the investment cost.

References

1. Barbaro, A., Bagajewicz, M. J., New rigorous one-step MILP formulation for heat exchanger network synthesis, *Computers and Chemical Engineering* 29 (2005) 1945–1976.
2. Pettersson, F., Synthesis of large-scale heat exchanger networks using a sequential match reduction approach, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 29, Issue 5, 15 April 2005, Pages 993–1007

ANNEXE 3

Article

Titre: Application of Bridge Analysis to Retrofitting Direct- and Indirect-Contact Exchange networks

Auteurs : J.-C. Bonhivers et P. R. Stuart

Journal : soumis à *Applied Thermal Engineering*.

Application of bridge method to retrofitting direct- and indirect-contact heat-exchange networks

Jean-Christophe Bonhivers and Paul Stuart

^a NSERC Chair in Design Engineering, Department of Chemical Engineering, Ecole Polytechnique de Montreal, P.O. Box 6079, Station Centre-Ville, Montreal, Quebec H3C 3A7, CANADA

E-mail: paul.stuart@polymtl.ca

Phone : +1 514 340 4711 ext. 4384

Abstract

The process manufacturing industry uses a lot of energy through direct and indirect heat exchanges. Reducing heat consumption implies decreasing the flow rate of heat cascaded from the heating utility to the environment. This flow rate can be decreased by modifying heat exchanges. Bridge analysis enumerates the fundamental sets of heat-saving modifications which are called “bridges”. In previous papers, the method has been applied to networks including only indirect-contact heat transfer. This paper extends the concept of a bridge to reducing heat consumption in networks including both direct- and indirect-contact heat exchanges. Rules for data extraction are first proposed. Then bridge analysis is used to identify heat-saving modifications in two examples and in the hot-water production system of an existing Kraft pulp mill. The heat-saving modifications are enumerated, and the final network topology is presented. Advantages of bridge analysis are the following: the evaluation of bridge heat-saving capacity corresponds to a small linear programming problem, and the number of bridges is relatively small. The final network topology corresponding to bridge modifications can be identified by engineering analysis or mathematical programming.

Key words: energy integration, retrofit, heat-exchanger network, direct-contact heat exchange, mixing

1. Introduction

1.1. Problem context and importance of the topic

The manufacturing process industries are large energy users. Energy analysis methods for new and existing plants have been developed in recent decades to increase their profitability and reduce the environmental impacts of their activities [1, 6]. The heat system of a plant involves the following areas: (1) the utilities system, which includes the production of heat, electricity, and cooling, (2) the heat exchanger network (HEN), and (3) the process operations.

To reduce heat consumption by HEN retrofit, it is necessary to reduce the flow rate of heat cascaded from the hot utility through heat exchanges until the environment. Consequently, it is necessary to bridge heat outlets to hot utility users through HEN modifications. The concepts of bridge analysis to reduce heat consumption in existing networks composed only of indirect-contact heat exchanges have been presented in [7–9]. A method has been developed to enumerate the sets of fundamental heat-saving modifications. These sets are called “bridges”.

However, modifications to direct-contact heat exchanges, which include stream mixing, recycle, or substitution, can also result in a decrease in the flow rate of heat cascaded from the heating utilities to the environment. This paper presents an extension of bridge analysis to networks composed of both direct- and indirect-contact heat exchanges.

1.2. Earlier work

The several different approaches used in heat integration can be broadly classified as either (i) insight-based methods or (ii) optimization-based methods. Insight-based methods use graphical tools such as composite curves to calculate energy targets and heuristics for network design to achieve these targets [10, 13]. The main advantages of these methods are their simplicity, their graphical representation of the problem, and the involvement of the designer throughout the steps. Optimization-based methods [14, 20] use mathematical programming to minimize or maximize an objective function such as cost or profit with respect to constraints such as energy balances and heat-exchange models. However, optimization approaches for retrofitting heat-exchanger networks are complex and do not guarantee identification of the global optimum. Pinch-based approaches, which do not guarantee to find the global optimum either, are more widely used for heat integration due to the simplicity of the concepts. The classical thermal pinch analysis technique, which was initially developed to design indirect-contact heat-exchange networks, has evolved over recent decades to address key industry energy analysis and design needs such as (a) network retrofit, (b) stream mixing, and (c) site-wide energy analysis.

Industrial processes include both indirect-contact heat exchanges, in which a minimum difference in stream temperature results from the trade-off between energy savings and capital spending, and direct-

contact heat exchanges such as non-isothermal mixing or steam injection into liquid. The heat-transfer constraints depend on the streams involved in the connection. For example, a demand for hot water may be satisfied by reusing water produced somewhere in the process, which requires a minimum temperature difference (equal to zero) between the source and the demand, or by heating cold water through indirect-contact heat exchange, for which a sufficient temperature difference is necessary to limit the investment cost for exchange surface area. However, pinch analysis does not consider explicitly the practical constraints specific to each connection. In consequence, data extraction, interpretation of targets, and identification of practical projects are complex in retrofit situations involving several types of heat transfer. Experience is essential, and therefore heuristics have been developed for pinch analysis.

Water is used in industrial processes for washing, diluting, dissolving, or transporting, and may be involved in mixing, stored in tanks, or reused in a process operation. In processes that use a lot of water, the water network and heat consumption are strongly interrelated. The chemicals, pulp and paper, and food and beverage industries, which use a lot of water, have benefitted from pinch analysis. However, identification of energy-saving projects for processes that use a lot of water requires consideration of the interactions between mass and heat networks. Therefore, recent progress in process integration has been focused on developing methodologies to combine heat integration and mass/water integration [21, 24].

Wising et al. [25] evaluated the potential for energy savings when reducing water consumption in a Kraft pulp mill. In existing mills, warm and hot water is often overproduced, and both warm- and hot-water tanks are commonly overflowed to a cooling tower or drained away. Analysis has shown that the amount of excess heat that can be released at high temperature, i.e., above 80°C, increases as process water consumption decreases. A part of this heat could be recovered, e.g., to evaporate black liquor through a modified multi-stage evaporator, to feed a heat pump, or to integrate new bioprocesses into pulp mills (the concept of the “integrated biorefinery”). The interactions between the heat and water networks in thermo-mechanical newsprint pulp mills have been studied in [26, 27]. Results showed that non-isothermal mixing and water reuse should systematically be included in the analysis and that a decrease in water consumption can lead to significant heat savings.

Nordman et al. [28] developed a method to modify the hot- and warm-water systems in a Kraft pulp mill to release high-temperature excess heat. They developed “tank curves” to evaluate the number of water tanks and temperature levels required to maximize the amount of excess heat. This approach involves (1) constructing the hot composite curve relative to the hot- and warm-water systems and the cold composite curves for the process water demands, (2) shifting the cold composite curves until the chosen minimum temperature difference is reached and evaluating the theoretical target for the maximum excess heat, and (3) replacing the cold composite curve with the tank curve and varying the number of tank temperature levels to maximize the amount of excess heat.

Savulescu et al. [29, 31] showed the impact of water-network data extraction on the results of thermal pinch analysis. Different sets of data extracted from the same water network may lead to different

energy targets and different numbers of units in the network. Guidelines for extracting data on water streams are proposed to minimize the energy targets and to simplify a network by implementing water-stream mixing together with indirect-contact heat exchangers. They proposed direct heat-transfer composite curves and indirect heat-transfer composites to design a heat-recovery network of water systems in the pinch-analysis framework. They also introduced the concept of a kink-decomposition criterion to guide the segregation of direct and indirect heat transfers and to design simple networks. An overall approach for combined energy and water analysis which includes these results was developed [32, 34].

Mateos-Espejel et al. [35, 37] proposed a unified methodology to improve the thermal energy efficiency of direct- and indirect-contact heat-exchanger networks. Their interaction analysis step incorporates several energy-enhancing techniques in a structured manner that makes the best use of synergies. These techniques include internal heat recovery with indirect-contact heat exchanges, water reuse, suppression of non-isothermal mixing, energy upgrading using a heat pump, recovery of condensates, and analysis of the utility system.

1.3. Synthesis of literature review

Optimization models for HEN retrofit are highly complex and do not guarantee to reach the global optimum. As a consequence, approaches based on pinch analysis, which has been developed for the synthesis of new HENs including only indirect-contact heat exchanges, are the most widely used. Although many developments have been achieved in the course of applying this tool to HEN retrofits and non-isothermal mixing, difficulties in data extraction, targeting, and network redesign are still encountered.

Energy is conserved and degraded through process operations and heat exchanges. Reducing heat consumption implies reducing the flow rate of heat transferred from the heating utility until the environment and passing through operations or heat exchanges. This progressive transfer of heat in existing process operations and heat exchanges from the heating utility to the environment is not explicitly analyzed in present heat-integration methods. The advanced composite curves which have been developed for HEN retrofit do represent the cumulative heat transfers through the initial heaters and coolers, but do not represent transfers in existing process-process heat exchangers nor in individual process operations.

1.4. Objectives of the paper

Bridge analysis enumerates the bridges. These are sets of matches that reduce the flow rate of heat cascaded from the heating utility until the environment and consequently result in reduced heat

consumption. Only applications to indirect-contact heat transfers have been described in previous works [7-9]. The aim of this paper is to present an extension of bridge analysis to networks composed of both direct- and indirect-contact exchanges.

Specific objectives

- Description of data extraction rules for bridge analysis in HEN including direct- and indirect-contact heat exchanges.
- Applications of the bridge method involving a combination of direct- and indirect-contact heat exchanges.

1.5. Structure of the paper

First, the principles of bridge analysis are presented. The next part describes how to extract data. Then the application of bridge analysis to two examples and to the hot-water production system of an existing Kraft pulp mill is presented. Finally, results are discussed.

1.6. Terminology and conventions

In a heat exchanger, heat is transferred from a supplier to a receptor. In bridge analysis, process heat sources are decomposed into suppliers in the existing HEN, and process heat demands are decomposed into receptors in the existing HEN. The letter E refers to any internal (process-process) heat exchange by either direct transfer or indirect contact. The letter D refers to a direct transfer of heat which may involve stream mixing, recycle, or substitution. A process-process indirect-contact heat exchange is denoted as I . A match is a couple composed of a supplier and a receptor. For example, the match corresponding to heater H_z is denoted as $h_z^s h_z^r$. The conventions used in this paper are shown in [Table 1](#).

c_x^r : Receptor of cooling system C_x

c_x^s : Supplier of cooling system C_x

C_x : Cooling system

D_y : Process-process heat exchange by direct transfer D_y

d_y^r : Receptor of D_y

d_y^s : Supplier of D_y

E_y : Process-process heat exchange either by direct transfer D_y or indirect-contact heat exchange I_y

e_y^r : Receptor of internal heat exchanger E_y

e_y^s : Supplier of internal heat exchanger E_y

I_y : Process-process heat exchange by indirect-contact

i_y^r : Receptor of I_y

i_y^s : Supplier of I_y

$\dot{Q}(T)$: Flow rate of energy transferred through temperature T , kW

Env: Environment

H_z : Heater

h_z^r : Receptor of heater H_z

h_z^s : Supplier of heater H_z

HU: Hot utility

T_c : Cold-end temperature

T_e : Environment temperature

T_h : Hot-end temperature

Table 1 Conventions for heat exchanges

Equipment	Cooling system, C_x	Internal heat exchanger, E_y	Heater, H_z
Match	$c_x^s \ c_x^r$	$e_y^s \ e_y^r$	$h_z^s \ h_z^r$
Source stream	Process sources		Heating utility, HU
Supplier	c_x^s	e_y^s	h_z^s
Heat transfer	↓	↓	↓
Receptor	c_x^r	e_y^r	h_z^r
Sink stream	Environment, Env	Process demand	

2. Principle of bridge analysis to reduce heat consumption by HEN retrofit

Energy is conserved and degraded through heat exchanges and process operations. To reduce heat consumption in an existing HEN, it is necessary to reduce the flow rate of cascaded heat from the heating utilities to the environment by modifications in the heat exchangers. These heat-saving modifications imply bridging heat outlets to hot utility users [7–9].

Bridge analysis has been developed for HEN retrofit and includes the following:

1. A description of the fundamental sets of modifications to save energy, which are called “bridges”.
2. A method to enumerate the bridges.
3. A network table to evaluate them easily.
4. An energy-transfer diagram which can be used to identify the heat-saving modifications (bridges).

In bridge analysis, process heat sources are decomposed into suppliers of process-process heat exchanger e_y^s and suppliers of cooler c_x^s in the existing network. Process heat demands are decomposed into receptors of process-process heat exchanger e_y^r and receptors of heater h_z^r in the existing network. Note that c_x^s and h_z^r represent a heat outlet and a hot utility user respectively.

Bridge description

A match is a couple composed of a supplier and a receptor. A set of matches connecting heat outlets to hot utility users is called a “bridge”. A prime bridge cannot be decomposed into other bridges and has one of the two following formats:

$$\begin{aligned} & \{c_x^s h_z^r\} \\ & \text{or} \\ & \{c_x^s e_{y1}^r, e_{y1}^s e_{y2}^r, \dots, e_{yn-1}^s e_{yn}^r, e_{yn}^s h_z^r\}, \end{aligned}$$

where x is the label of a cooler C , z is the label of a heater H , and $\{y1, \dots, yn\}$ is a subset of n distinct labels of process-process exchangers E .

In a bridge of the first format, heat that was sent to the environment before retrofit is directly used to supply the receptor of a heater. In a bridge of the second format, heat that was sent to the environment before retrofit is used to supply the receptor of an internal heat exchanger; the supplier of this exchanger before retrofit, which is now partially or totally released, can be used for another receptor, and so on until reaching the receptor of a heater. Heat transfer along a bridge is the fundamental way to save energy. Composite bridges can be decomposed into other bridges. For a given set of streams, only bridges can lead to heat savings.

Identification of bridges

Bridges can be identified using an algorithm, a grid diagram, an energy-transfer diagram, or a network table. The following approach is proposed to reduce the number of operations needed for the enumeration of bridges:

- The set of potential matches is the union of relevant prime bridges. A prime bridge is considered as relevant if its investment cost is non-prohibitive and if its heat-saving capacity is significant.
- Bridges are identified according to an increasing number of matches which are all included in the set. The enumeration stops when the heat-saving capacity no longer increases.

Evaluation of the heat-saving capacity of a bridge

Evaluation of the heat-saving capacity of a bridge corresponds to a small linear programming problem. A formulation based on the transshipment or transportation model can be used. A network table which fits the transportation model is proposed for easy evaluation of heat-saving capacity and estimation of exchange surface area. The formulation based on the transportation model for evaluation of the heat-saving capacity of a bridge is described hereafter.

Detailed evaluation and identification of the final HEN topology

The final network topology can be identified by either engineering analysis or mathematical programming. The optimization approach implies the use of binary variables to take design constraints into account. The MILP formulations developed by Pettersson [38] or Barabaro et al. [19] are particularly convenient because they use a transportation model for heat exchanges, which fits the network table. A MINLP formulation based on a superstructure is also convenient. Because the only decision variables are related to bridge modifications, the size of the optimization problem is reduced. The choice of final topology should also consider operability criteria, which include flexibility, controllability, reliability, safety, and easy start-up and shut-down.

Heat-transfer diagram

The heat-transfer diagram (example in Figure 2) shows the degradation of heat from the heating utilities to the environment through heat exchanges. Each curve represents the flow rate of cascaded heat through a heat exchanger [9]. This diagram shows that saving heat implies bridging a heat outlet to a heating utility user through a set of matches between suppliers and receptors. Heat savings result in a down-translation of the total network curve. All the bridges can be identified on the diagram.

Linear transportation formulation to evaluate the heat-saving capacity of a bridge

To formulate the linear transportation model, the following sets are defined:

- $I = \{i | i \text{ is a supplier of a heat source}\}$
- $K = \{k | k \text{ is a receptor of a heat demand}\}$
- $J = \{j | j \text{ is a temperature interval in } i \in I\}$
- $L = \{l | l \text{ is a temperature interval in } k \in K\}$
- $B = \{(i, k) | (i, k) \text{ is a match involved in the bridge}\}$
- $N = \{(i, j, k, l) | (i, j, k, l) \text{ is a non - feasible heat transfer area}\}$

The variables are the following:

$q_{i,j,k,l}$ Heat transferred from supplier i in its temperature interval j to receptor k in its temperature interval l

$q_{hu,k,l}$ Heat transferred from a hot utility to receptor k in its temperature interval l

$q_{i,j,cu}$ Heat transferred from supplier i in its temperature interval j to a cold utility

$Q_{i,j}$ Available heat in supplier i in its temperature interval j

$Q_{k,l}$ Required heat by receptor k in its temperature interval l

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} q_{hu,k,l} \quad (1)$$

$$Q_{i,j} = \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} q_{i,j,k,l} + q_{i,j,cu} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (2)$$

$$Q_{k,l} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{i,j,k,l} + q_{hu,k,l} \quad \forall k \in K, l \in L \quad (3)$$

$$q_{i,j,k,l} = q_{i,j,k,l}^0 \quad \forall (i, k) \notin B \quad (4)$$

$$q_{i,j,k,l} = 0 \quad \forall (i, j, k, l) \in N \quad (5)$$

$$q_{i,j,k,l} \geq 0 ; \quad q_{i,j,cu} \geq 0 ; \quad q_{hu,k,l} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, l \in L \quad (6)$$

The objective function in Equation (1) is stated as the total heat consumption. Equations (2) and (3) represent the energy balance in each temperature interval for each supplier i and receptor k . Equation (4) states that heat transfer $q_{i,j,k,l}$ is equal to its initial value if match (i, k) is not involved in the bridge.

Equations (5) and (6) mean respectively that infeasible heat transfers are null and that all the variables are positive.

The LP problem to evaluate the heat-saving capacity of a bridge can easily be solved with the Excel solver using the network table format [7].

3. How to extract data for direct- and indirect-contact heat exchanges

a. Three key steps for data extraction in a HEN retrofit

To identify heat-saving modifications, it is necessary to

1. characterize the process sources and demands,
2. describe how these sources and demands are managed in the existing HEN, and
3. define the constraints in possible new heat exchanges.

The first step includes identification of the process heat demands and process heat sources and their characterization such as the cold- and hot-end temperatures, the heat load, and the heat-transfer coefficient. The second step includes the description of how these sources and demands are managed before retrofit, i.e., how these are decomposed into suppliers or receptors in the existing HEN. The third step includes the definition of connection-specific constraints, such as the practical feasibility and the type of heat transfer. In this step, a minimum temperature difference is specified for each feasible connection, which depends on the type of heat transfer, heating utility cost, exchange surface area price, and heat-transfer coefficients.

b. Two data extraction rules for direct-contact heat exchange

Rule 1: Cold-end temperature of water demands and sources equal to environment temperature

Any reduction of heat consumption by HEN retrofit implies decreasing the flow rate of heat transferred from the heating utility to the environment and passing through the heat exchanges. The heat degradation is maximal at the environment temperature. Heat in water above the environment temperature can be recovered by indirect-contact heat exchange or by direct heat transfer through allocation to a demand. For example, a demand for hot water can be satisfied by an indirect-contact exchange involving a process heat source or by directly using hot water. Note that the environment temperature can also be chosen as the cold-end temperature for other streams, but this is useless if these streams cannot be reallocated due to their composition or properties. Hot-water streams, however, can be reallocated to satisfy heat demands.

Rule 2: Minimum allowed temperature difference equal to zero for perfect mixing of streams

The model of perfect mixing implies that no minimal temperature difference between streams is necessary for this operation.

These two highlighted rules for data extraction are consistent with good-sense principles of engineering analysis and are summarized in [Table 2](#).

Table 2: Key points for data extraction

a. Characterization of the following is necessary:

1. Process heat sources and demands
2. Existing heat exchanges
3. Connection constraints.

b. The following rules are used to consider direct-contact heat exchanges:

1. The cold-end temperature of water sources and demands is the environment temperature.
2. For a model with perfect mixing of streams, the minimum allowed temperature difference is equal to zero.

4. Example 1 – A simple water network

Problem description

The network of Example 1 is shown in **Figure 1a**. It includes three water heat sources, one water heat demand, and one non-water heat demand. Heater H1 needs 3000 kW; cooler C1 removes 3000 kW. The objective is to reduce the heat consumption by network modification.

Data extraction

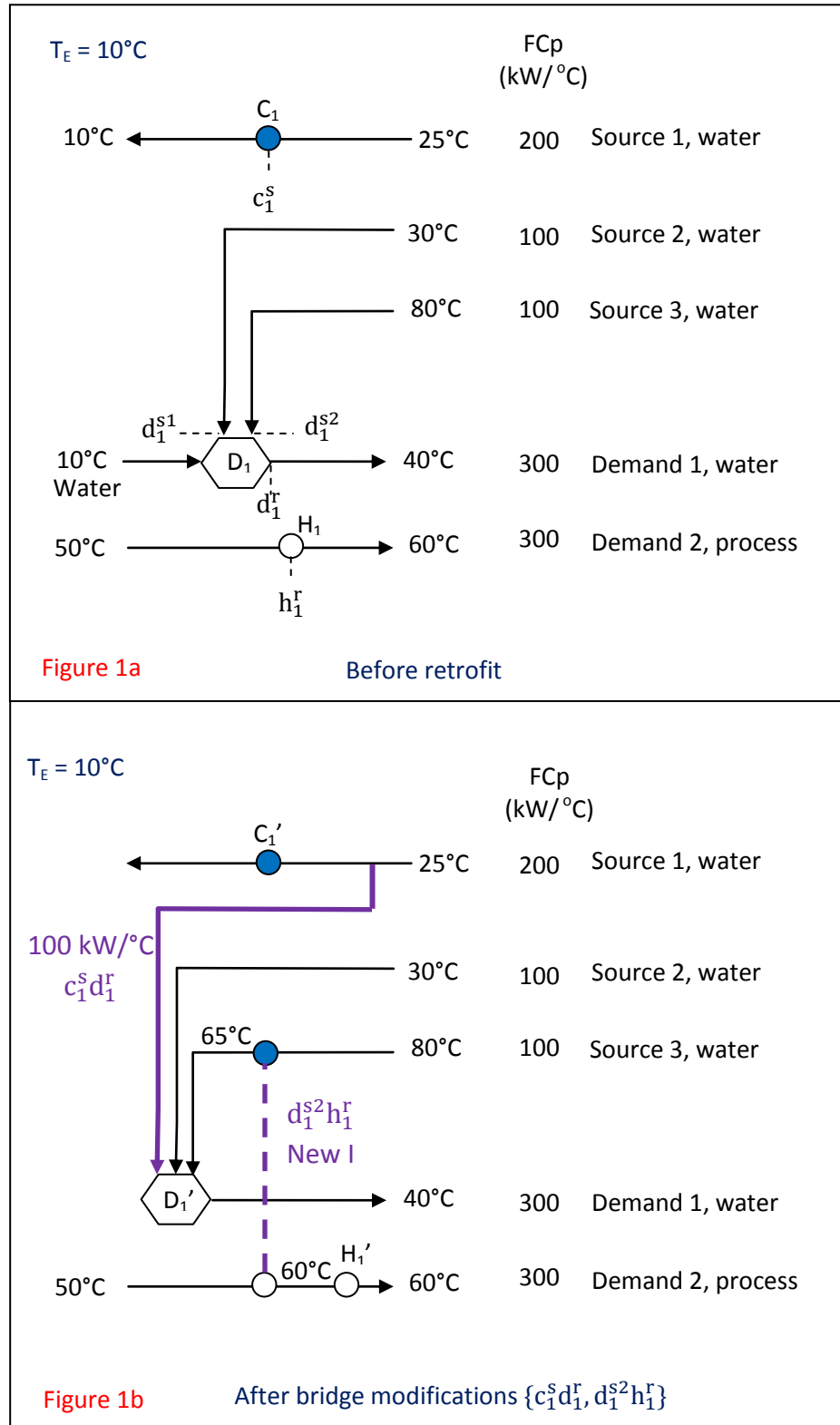
- *Step 1: Characterization of process sources and demands*
 - From the process flowsheet presented in Figure 1a, one can identify heat demands and heat sources, as well as characterize their cold- and hot-end temperatures and heat loads.
 - The cold-end temperature of water sources and demands is equal to the environment temperature (10°C). Water at the environment temperature is not considered as a heat source.
- *Step 2: Description of the existing HEN*
 - One cooler (C_1), one mixer (D_1), and one heater (H_1) are used.
 - The two suppliers of direct-contact heat transfer D_1 are denoted as d_1^{s1} and d_1^{s2} ; its receptor is denoted as d_1^r .
 - The cold-end temperature of water suppliers and receptors is equal to the environment temperature (10°C).
- *Step 3: Definition of connection constraints in the new heat exchanges*
 - Any connection is allowed.
 - Water streams may be mixed.
 - The minimum temperature difference allowed in indirect-contact heat exchanges is equal to 10°C, and the minimum temperature difference allowed in direct heat transfers by water mixing is equal to 0°C.

The extracted data are presented in **Table 3**.

Results

- The list of bridges with their corresponding heat-saving capacities is shown in **Table 4**. The maximum heat savings is equal to 1500 kW. The only bridge is the set $\{c_1^s d_1^r, d_1^{s2} h_1^r\}$. To save energy, the heat outlet has to be used for demand 1, and the released part of source 3 has to be used for demand 2. A network table can be used to evaluate easily the heat-saving capacity of a bridge, which corresponds to a small LP problem based on the transportation model already described, and to identify the resulting topology. The network after retrofit is shown in **Figure 1b**. Notice that the water consumption has also been reduced.
- The heat-transfer diagram in **Figure 2a** shows the maximum heat savings without any constraint, which are equal to 1500 kW (corresponding to the minimum value of the network curve), and also bridge modifications to reduce the heat consumption. The heat-transfer diagram after

retrofit is presented in [Figure 2b](#). The minimum of total heat flow rate is equal to zero, i.e., no more heat savings are possible.



Figures 1 Network of example 1 before and after retrofit

Table 3:

Extracted data for example 1

Part 1: process sources and demands					Part 2: existing heat exchanges			
Id	Type	Q (kW)	T _c (°C)	T _h (°C)	Id	Q (kW)	T _c (°C)	T _h (°C)
Process heat sources					Heat suppliers			
Source 1	water	3000	10	25	c_1^s	3000	10	25
Source 2	water	2000	10	30	d_1^{s1}	2000	10	30
Source 3	water	7000	10	80	d_1^{s2}	7000	10	80
Process heat demands					Heat receptors			
Demand 1	water	9000	10	40	d_1^r	9000	10	40
Demand 2	process	3000	50	60	h_1^r	3000	50	60
Part 3: connection constraints <ul style="list-style-type: none"> ○ Any connection is allowed ○ Type of heat exchange involving only water: direct-contact, perfect mixing ○ Minimum allowed ΔT for direct-contact heat transfers: 0°C ○ Type of heat exchange involving process demand: indirect-contact ○ Minimum allowed ΔT for matches with process demand: 10°C 								

Table 4: List of bridges for example 1

Bridge	Savings (kW)
$\{c_1^s d_1^r, d_1^{s2} h_1^r\}$	1500
Maximum heat savings: 1500 kW	

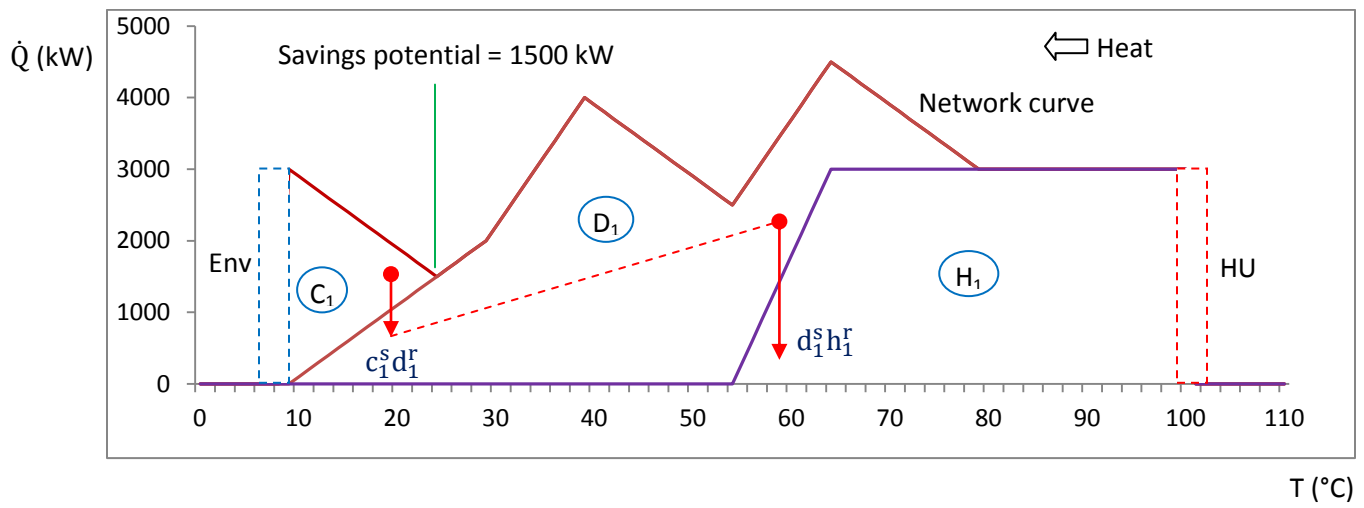


Figure 2a Heat-transfer diagram of example 1

Arrows show bridge modifications for heat savings: $\{c_1^s d_1^r, d_1^{s2} h_1^r\}$

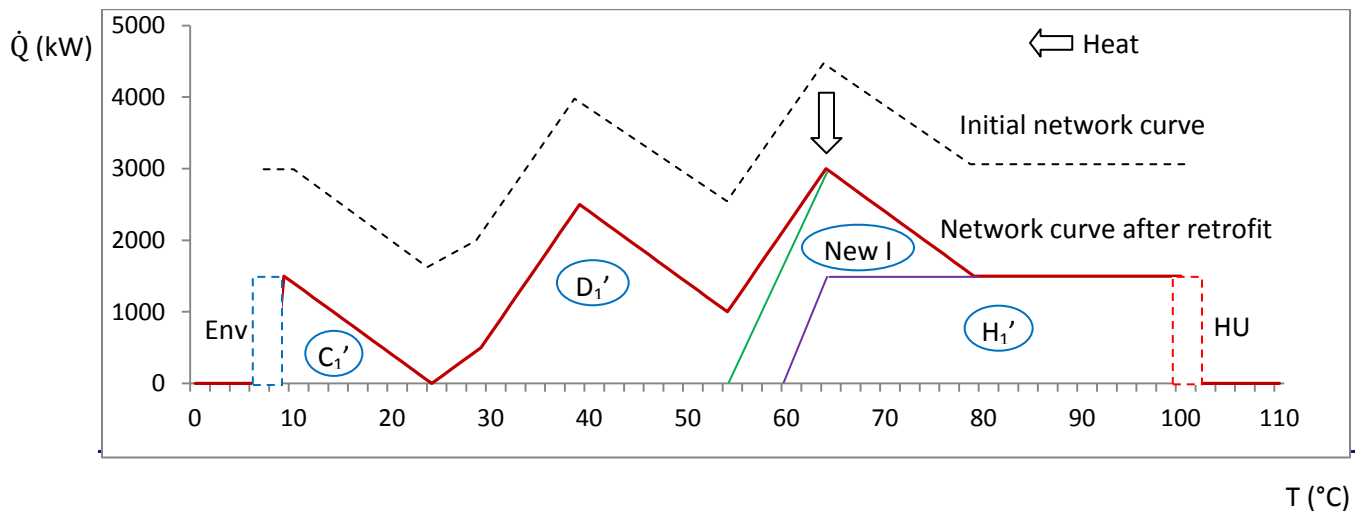


Figure 2b Heat-transfer diagram of example 1 after retrofit

Bridge modifications $\{c_1^s d_1^r, d_1^{s2} h_1^r\}$

5. Example 2 - A simple water network

Problem description

The example network shown in [Figure 3a](#) includes two water heat sources, two non-water heat sources, two water heat demands, and a non-water heat demand. Heaters H_1 and H_2 together need 700 kW; cooler C_1 removes 600 kW. The objective is to reduce the heat consumption by network modification.

Data extraction

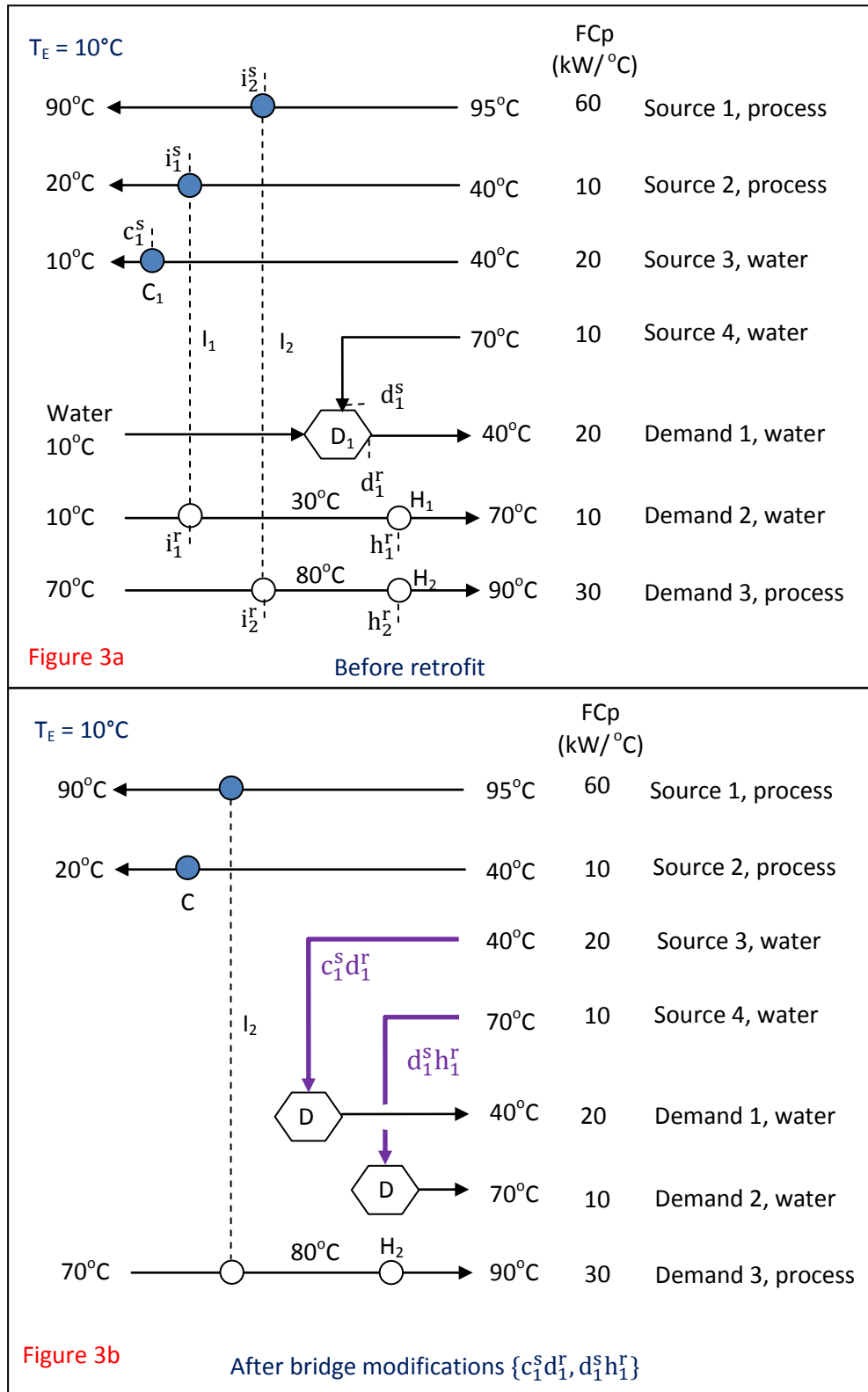
Similarly to the previous example 1, data are extracted in three key steps. For simplicity, the summary table is omitted in this example.

- *Step 1: Characterization of process sources and demands*
 - From the process flowsheet presented in [Figure 3a](#), one can identify heat demands and heat sources and characterize their cold- and hot-end temperatures and heat loads.
 - The cold-end temperature of water sources and demands is equal to the environment temperature (10°C). Water at the environment temperature is not considered as a heat source.
- *Step 2: Description of the existing HEN*
 - One cooler (C_1), one mixer (D_1), two indirect-contact heat exchangers (I_1 and I_2), and two heaters (H_1 and H_2) are used.
 - The receptor and supplier of direct-contact heat transfer D_1 are denoted as d_1^r and d_1^s respectively.
 - The cold-end temperature of water suppliers and receptors is equal to the environment temperature (10°C). Heat loads of receptor d_1^r and supplier d_1^s are equal to 600 kW.
- *Step 3: Definition of connection constraints in the new heat exchanges*
 - Any connection is allowed.
 - Water streams may be mixed.
 - The minimum temperature difference allowed in indirect-contact heat exchanges is equal to 10°C, and the minimum temperature difference allowed in direct heat transfers by water mixing is equal to 0°C.

Results

- The list of bridges with the corresponding heat savings is presented in [Table 5](#). Maximum heat savings are equal to 400 kW. Bridge $\{c_1^s d_1^r, d_1^s h_1^r\}$ is necessary to achieve the minimum heat consumption; that is, heat sent to cooler C_1 has to be used for demand 1, and released source 4 has to be used for demand 2. The network after retrofit is shown in [Figure 3b](#). Note that the water consumption has also been reduced.
- The heat-transfer diagram in [Figure 4a](#) shows the maximum heat savings without any constraint, which are equal to 400 kW (corresponding to the minimum value of the network curve), and the bridge modifications to minimize heat consumption. The heat-transfer diagram after retrofit is

presented in **Figure 4b**. The minimum of the total heat flow rate is equal to zero, i.e., no more heat savings are possible.



Figures 3 Network of example 2 before and after retrofit

Table 5: List of bridges for example 2

id	Bridges	Savings (kW)
1	$\{c_1^s h_1^r\}$	100
2	$\{c_1^s d_1^r, d_1^s h_1^r\}$	400
3	$\{c_1^s i_1^r, i_1^s d_1^r, d_1^s h_1^r\}$	200
Maximum heat savings: 400 kW		

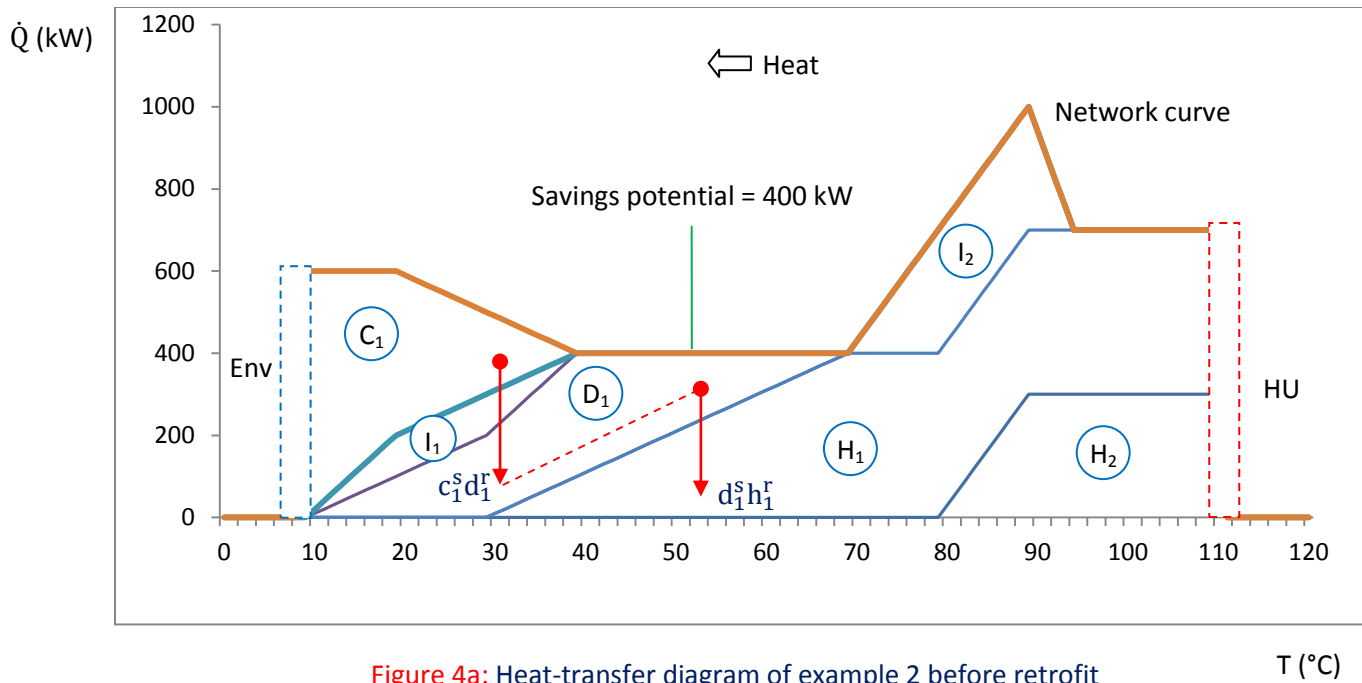


Figure 4a: Heat-transfer diagram of example 2 before retrofit
Arrows show bridge modifications to minimize heat consumption

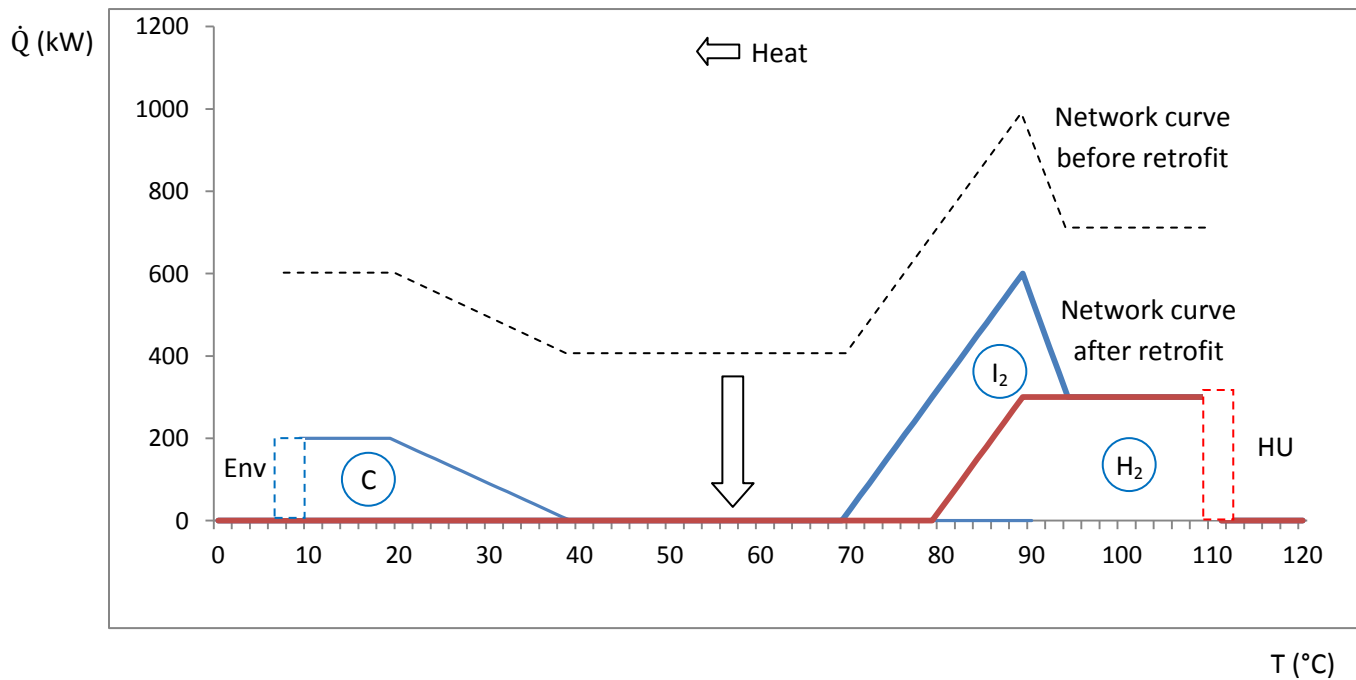


Figure 4b: Heat-transfer diagram of example 2 after retrofit
Bridge modifications $\{c_1^s d_1^r, d_1^s h_1^r\}$

6. Example 3: hot-water production system of a Kraft pulp mill

Process description

In a Kraft pulp mill, hot water is used mainly for diluting and washing the pulp. The network of an existing hot-water production system is shown in **Figure 5a**. It includes three water heat sources, three process heat sources, and three water heat demands, and also a hot water tank, which is sometimes in excess or deficit due to the process dynamics and the management of water tank levels by the mill. The system includes a water tank (D_1) at 65°C rejecting 6900 kW to the environment (C_1) and uses 3480 kW in hot utility to obtain water at 85°C (H_1).

Data extraction

- *Step 1: Characterization of process sources and demands*
 - From the process flow sheet presented in **Figure 5a**, one can identify heat demands and heat sources and characterize their cold- and hot-end temperatures and heat loads.
 - The cold-end temperature of water sources and demands is equal to the environment temperature (10°C).
- *Step 2: Description of the existing HEN*
 - One cooler (C_1), one mixer (D_1), three indirect-contact heat exchangers (I_1 , I_2 , and I_3), and one heater (H_1) are used.
 - The cold-end temperature of water suppliers and receptors is equal to the environment temperature (10°C).
 - The three inlets of hot-water tank D_1 are denoted as d_1^{s1} , d_1^{s2} , and d_1^{s3} . The two outlets are denoted as d_1^{r1} and d_1^{r2} , corresponding to water used to satisfy the process needs and the tank overflow respectively. The cold-end temperature, the hot-end temperature, and the mass flow rate of receptor d_1^r are equal to 10°C, 65°C, and 232 kg/s respectively.
- *Step 3: Definition of connection constraints in the new heat exchanges*
 - Any connection is allowed.
 - Water streams may be mixed.
 - The minimum temperature difference allowed in indirect-contact heat exchanges is equal to 10°C, and the minimum temperature difference allowed in direct heat transfers by water mixing is equal to 0°C.

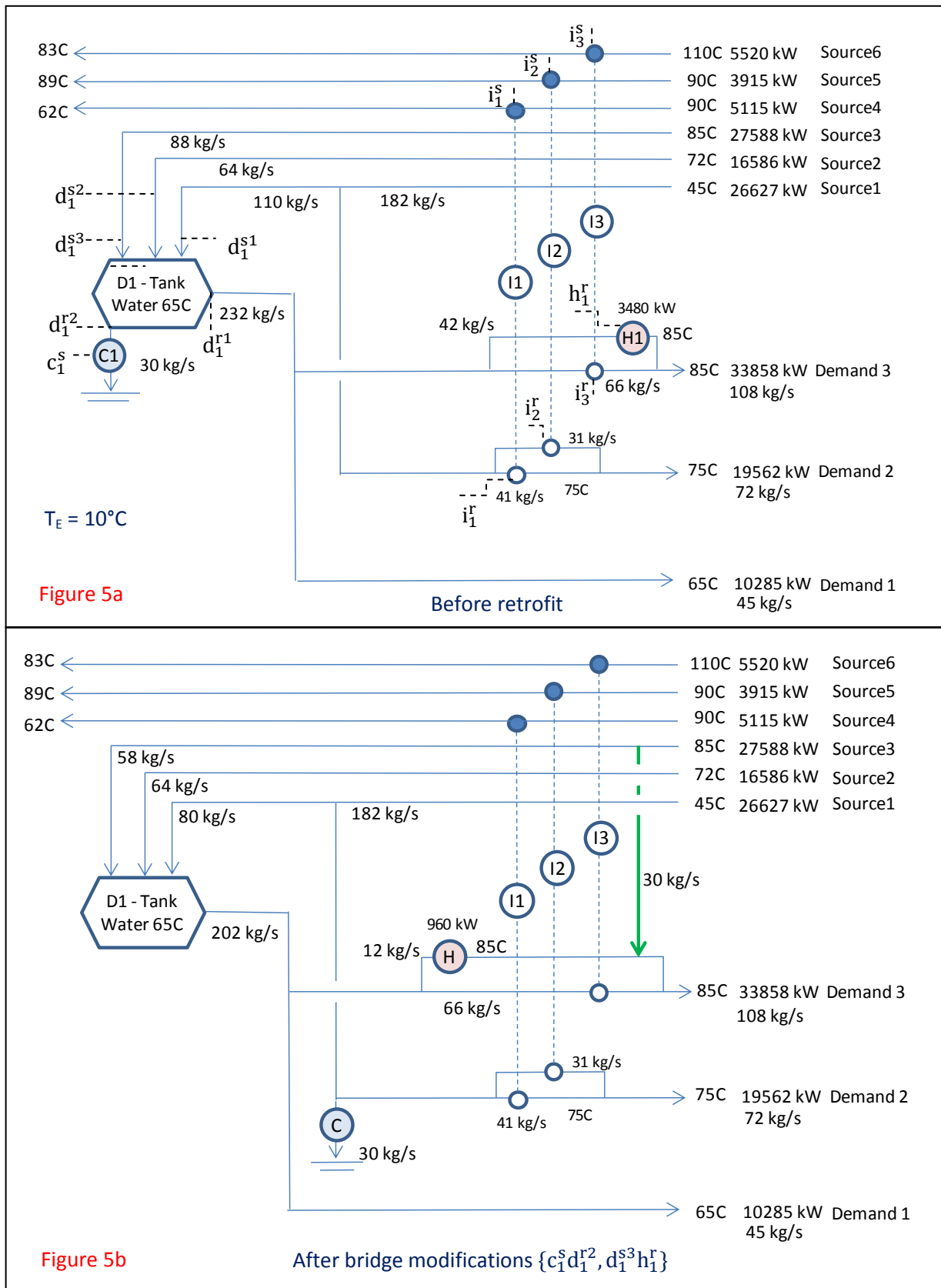
For simplicity, the summary table is not shown in this example.

Results

- The list of bridges with the corresponding heat savings is shown in **Table 6**. The maximum heat savings are equal to 2520 kW. Two bridges lead to maximum heat savings: $\{c_1^s d_1^{r2}, d_1^{s3} h_1^r\}$ and $\{c_1^s i_2^r, i_2^s h_1^r\}$. Bridge $\{c_1^s d_1^r, d_1^{s3} h_1^r\}$ implies two simple modifications: to improve the control of hot-water tank inventory to avoid overflow, and then to use a water source that feeds this tank

for hot utility user h_1^r . Bridge $\{c_1^s i_2^r, i_2^s h_1^r\}$ implies more complex modifications: to replace water at 45°C in indirect-contact heat exchanger I_2 by water at 65°C now sent to the environment and then to use the released supplier of I_2 to heat receptor H_1 . The network after bridge modifications $\{c_1^s d_1^{r2}, d_1^{s3} h_1^r\}$, which are simple and result in minimum heat consumption, is shown in **Figure 5b**. In the final network, water at 45°C is rejected from the system instead of water at 65°C.

- The heat-transfer diagram corresponding to the network before retrofit is presented in **Figure 6a**. Suppliers of process streams (which can only be implied in indirect-contact heat exchanges) have been shifted by minus 10°C, so that the minimum value of the network curve corresponds to the maximum heat savings with respect to the constraints of minimum temperature difference in direct- and indirect-contact heat exchanges. The minimum value of the network curve is equal to 2520 kW. Arrows show bridge modifications $\{c_1^s d_1^{r2}, d_1^{s3} h_1^r\}$. The heat-transfer diagram after retrofit is presented in **Figure 6b**. The minimum of the network curve after retrofit is equal to zero, i.e., no more heat savings are possible.

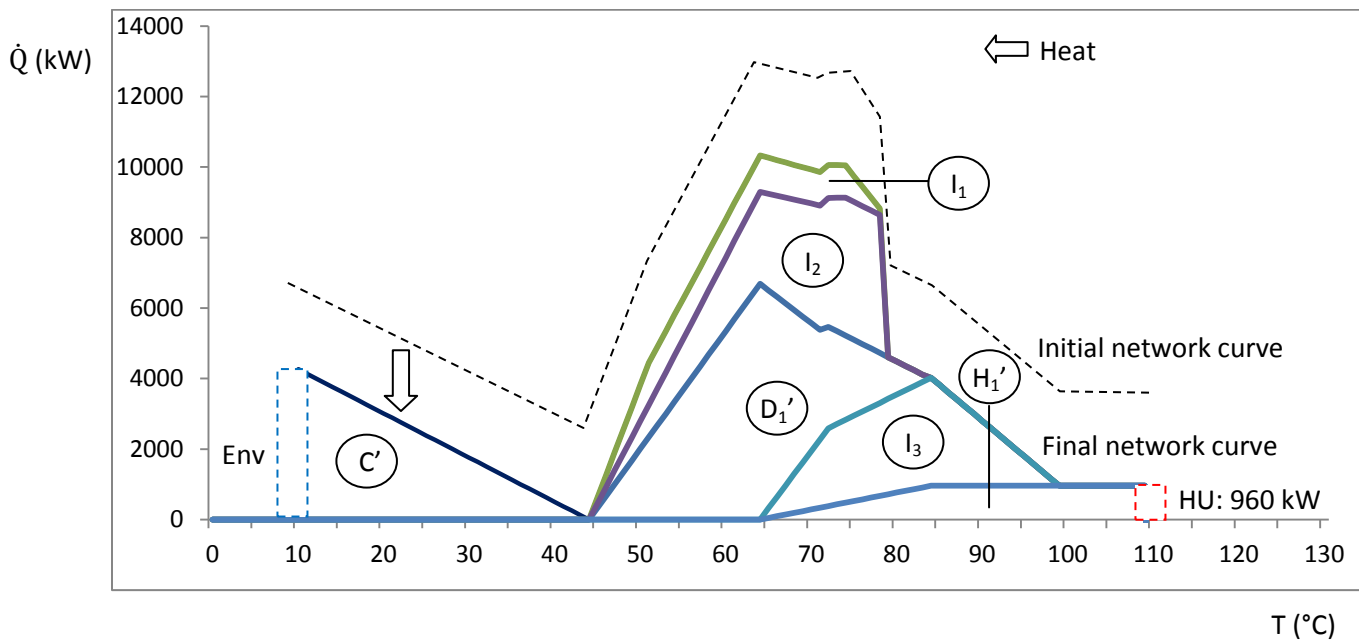
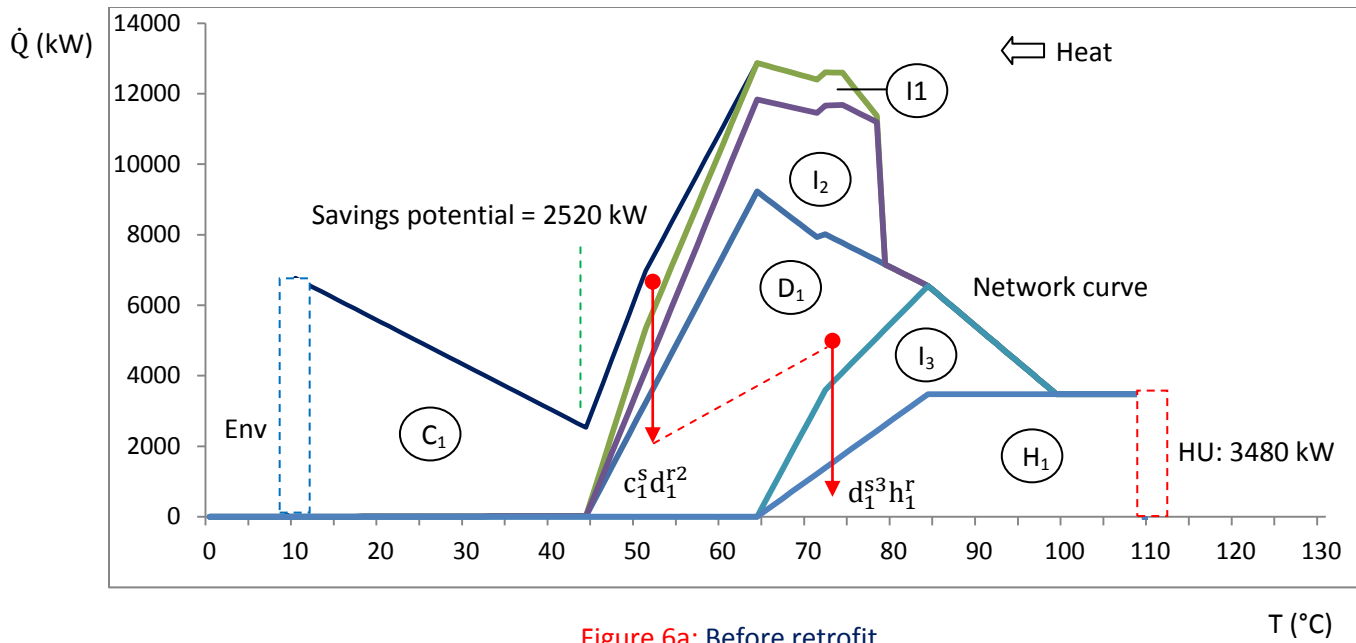


Figures 5 Hot-water production system of a Kraft pulp mill before and after retrofit

Table 6: List of bridges of example 3

Id.	Bridges	Savings (kW)
1	$\{c_1^s d_1^{r2}, d_1^{s2} h_1^r\}$	880
2	$\{c_1^s d_1^{r2}, d_1^{s3} h_1^r\}$	2 520
3	$\{c_1^s i_1^r, i_1^s h_1^r\}$	1 140
4	$\{c_1^s i_2^r, i_2^s h_1^r\}$	2 520

Maximum heat savings: 2520 kW



Figures 6: Heat transfer diagram of Example 3

7. Discussion of results

Identification of bridges

The number of bridges in the three examples is small. This shows an advantage of the analysis. A bridge is a fundamental set of modifications for heat savings; that is, for a given set of streams, only a bridge can lead to heat savings. Bridges are enumerated by increasing the number of matches until the heat savings no longer increase or until a criterion is satisfied, e.g., a maximum number of matches.

Evaluation of the heat-saving capacity of a bridge

Evaluation of the maximum heat savings from a bridge corresponds to a small LP problem. Either a transshipment model involving a heat cascade or a transportation model can be used to evaluate the maximum heat savings. The decision variables are heat flow rates through matches included in the bridge. Optimization can easily be performed using the Excel solver or other LP solvers using the network table format directly, which fits the transportation model [7, 8].

Heat-transfer diagram

Bridges can be enumerated using an algorithm, a network table, a grid diagram, or a heat-transfer diagram. The heat-transfer diagram shows the flow rate of cascaded heat as a function of the temperature in each heat exchanger. The minimum value of the network curve is equal to the maximum heat savings without any connection constraint. Bridges are heat-saving modifications that reduce the flow rate of heat cascaded from the heating utility to the environment. Saving energy results in down-translating the network curve.

Importance of process operations

The analysis of the heat cascade from the heating utility to the environment through heat exchanges leads to identification of heat-saving modifications that are limited to the HEN. However, heat is also degraded through other process operations. If these are considered, the entire industrial process can be analyzed using the same principles, and process modifications that reduce the flow rate of heat cascaded from the heating utility to the environment can be identified [9].

New criss-cross heat exchange

No supplementary criss-cross heat exchanges have been used in the three examples; however, these may sometimes be used due to lower investment costs. New criss-cross heat transfers are represented by upward arrows in the heat-transfer diagram [7, 8, and 9].

8. Conclusions

Reducing heat consumption implies decreasing the flow rate of heat transferred from the heating utility to the environment. This flow rate can be reduced by modifications to direct- or indirect-contact heat exchanges. Bridge analysis enumerates the fundamental sets of heat-saving modifications; these sets are called “bridges”.

The main contributions of this paper are the following:

1. Two data extraction rules are proposed to include direct- and indirect-contact heat exchanges in bridge analysis, which are consistent with good engineering sense:
 - Heat can be degraded until equilibrium with the environment is reached. Hot-water streams can be reallocated and cooled until the environment temperature is reached. As a consequence, the cold-end temperature of heat sources and demands involving water streams is set equal to the environment temperature.
 - If hot water can satisfy a heat demand by direct-contact heat exchange, the minimum temperature difference allowed for this match is equal to zero.
2. Bridge analysis has been applied to retrofit direct- and indirect-contact heat-exchange networks, including the hot-water production system of a Kraft pulp mill.

The advantages of bridge analysis are the following:

- The number of bridges is relatively small, which enables a robust analysis.
- The evaluation of the heat-saving capacity of a bridge corresponds to a rather simple LP problem.
- The method can be used for both direct- and indirect-contact heat-exchange networks.
- The final network can be identified by engineering analysis or mathematical programming.

9. References

1. Linnhoh, B., Townsend, D.W., Boland, D., A User Guide to Process Integration for the Efficient Use of Energy, 1st ed., Institute of Chemical Engineers (1982).
2. Yee, T.F., Grossmann, I.E., A screening optimization approach for the retrofit of heat exchanger networks, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 30, 146-162 (1991).
3. Asante, N.D.K., Zhu, X.X., An automated and interactive approach for heat exchanger network retrofit, *Transactions, Institute of Chemical Engineers*, 75, 349-360 (1997).
4. Zhu, X.X., Asante, N.D.K., Diagnosis and optimization approach for heat exchanger network retrofit, *AIChE J.*, 45, 1488-1503 (1999).
5. Smith, R., *Chemical Process Design and Integration*, McGraw-Hill, New York (2005).
6. Smith, R., Jobson, M., Chen, L., Recent development in the retrofit of heat exchanger networks, *Applied Thermal Engineering*, 30, 2281-2289 (2010).
7. Bonhivers, J.C., Bala, S., Stuart, P., Bridge analysis for heat exchanger retrofit, Part 1: Concepts, 2012, *Energy*, under revision.
8. Bonhivers, J.C., Bala, S., Stuart, P., Bridge analysis for heat exchanger retrofit, Part 2: Applications, 2012, *Energy*, under revision.
9. Bonhivers, J.C., Korbil, M., Bala, S., Stuart, P., Heat-transfer diagram for energy analysis of industrial processes, *Applied Thermal Engineering*, under revision.
10. Tjoe, T.N., Linnhof, B., Using pinch technology for process retrofit, *Chemical Engineering*, 93, 47-60 (1986).
11. Kemp, I.C., *Pinch Analysis and Process Integration: A User's Guide to Process Integration for the Efficient Use of Energy*, Butterworth-Heinemann, Oxford (2007).
12. Carlsson, A., Franck, P., Berntsson, T., Design better heat exchanger network retrofits, *Chemical Engineering Progress*, 89, 87-96 (1993).
13. Nordman, R., Berntsson, T., Use of advanced composite curves for assessing cost-effective HEN retrofit: I: Theory and concepts, *Applied Thermal Engineering*, 29, 275-291 (2009).
14. Athier, G., Floquet, P., Pibouleau, L., Domenech, S., A mixed method for retrofitting heat exchanger networks, *Computers and Chemical Engineering*, 22, 505-511 (1998).
15. Bochenek, R., Jezowski, J.M., Genetic algorithm approach for retrofitting heat exchanger network with standard heat exchangers. *Proceedings, 16th European Symposium on Computer-Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering*, pp. 871-876 (2006).
16. Ciric, A.R., Floudas, C.A., A retrofit approach for heat exchanger networks, *Computers and Chemical Engineering*, 13, 703-715 (1989).
17. Ciric, A.R., Floudas, C.A., A mixed integer nonlinear programming model for retrofitting heat exchanger networks, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 29, 239-251 (1990).
18. Furman, K.C., Sahinidis, N.V., Computational complexity of heat exchanger network synthesis, *Computers and Chemical Engineering* 25, 1371-1390 (2001).
19. Barbaro, A., Bagajewicz, M.J., New rigorous one-step MILP formulation for heat exchanger network synthesis, *Computers and Chemical Engineering*, 29, 1945-1976 (2005).
20. Rezaei, E., Shafiei, S., Heat exchanger network retrofit by coupling genetic algorithm with NLP and ILP methods, *Computers and Chemical Engineering*, 33, 1451-1459 (2009).

21. Wang, Y.P., Smith, R., Wastewater minimization, *Chem. Eng. Sci.*, 49(7): 981–1006 (1994).
22. El-Halwagi, M.M., *Pollution Prevention through Process Integration: Systematic Tools*, 1st ed., San Diego, California: Academic Press (1997).
23. Leewongtanawit, B., Kim, J., Improving energy recovery for water minimization, *Energy*, 34, 880–893 (2009).
24. Dhole, V.D., Ramchandani, N., Tainsh, R.A., Wasilewski, M., Make your process water pay for itself, *Chemical Engineering*, 1, 103–106 (1996).
25. Wising, U., Berntsson, T., Stuart, P., The potential for energy savings when reducing the water consumption in a Kraft pulp mill, *Appl. Therm. Eng.*, 25, 1057–1066 (2005).
26. Lafourcade, S., Fairbank, M., Stuart, P., Roadmap to minimum energy and water use for integrated newsprint mills, *Preprints, PAPTAC 92nd Annual Meeting*, A63–A69 (2006).
27. Lafourcade, S., Labidi, J., Koteles, R., Gélinas, C., Stuart, P., Thermal pinch analysis with process stream mixing at a TMP-newsprint mill, *Pulp and Paper Canada*, 104(12), 74–77 (2003).
28. Nordman, R., Berntsson, T., Design of Kraft pulp mill hot water system—a new method that maximizes excess heat, *Applied Thermal Engineering*, 26, 363 (2006).
29. Savulescu, L., Kim, J., Smith, R., Studies on simultaneous energy and water minimization, Part I: Systems with no water re-use, *Chem. Eng. Sci.*, 60, 3279–3290 (2005).
30. Savulescu, L., Kim, J., Smith, R., Studies on simultaneous energy and water minimization, Part II: Systems with maximum re-use, *Chem. Eng. Sci.*, 60, 3291–3308 (2005).
31. Savulescu, L., Sorin, M., Smith, R., Direct and indirect heat transfer in water network systems, *Applied Thermal Engineering*, 22(8), 981–988 (2002).
32. Savulescu, L., Poulin, B., Hamache, A., Bedard, S., Gennaoui, S., Water and energy savings at a Kraft paperboard mill using process integration, *Pulp and Paper Canada*, 106(9), 29–31 (2005).
33. Alva-Argaez, A., Savulescu, L., Poulin, B., A process integration-based decision support system for the identification of water and energy efficiency improvements in the pulp and paper industry, *Preprints, PAPTAC 93rd Annual Meeting*, (2007).
34. Savulescu, L.E., Alva-Argaez, A., Direct heat transfer considerations for improving energy efficiency in pulp and paper Kraft mills, *Energy*, 33, 1562–1571 (2008).
35. Mateos-Espejel, E., Savulescu, L., Paris, J., Base case process development for energy efficiency improvement, application to a Kraft pulp mill, Part I: definition and characterization, *Chem. Eng. Res. Des.*, 89, 729–741 (2011).
36. Mateos-Espejel, E., Savulescu, L., Paris, J., Base case process development for energy efficiency improvement, application to a Kraft pulp mill, Part II: benchmarking analysis, *Chem. Eng. Res. Des.*, 89, 742–752 (2011).
37. Mateos-Espejel, E., Savulescu, L., Marechal, F., Paris, J., Unified methodology for thermal energy efficiency improvement: application to Kraft process, *Chemical Engineering Science*, 66, 135–151 (2011).
38. Pettersson, F., Synthesis of large-scale heat exchanger networks using a sequential match reduction approach, *Computers and Chemical Engineering*, 29(5), 993–1007 (2005).

ANNEXE 4

Article

Titre: Energy Transfer Diagram for improving integration of industrial systems

Auteurs : J.-C. Bonhivers, M. Korbel, M. Sorin, L. Savulescu et P. R. Stuart

Journal: soumis à *Applied Thermal Engineering*.

Energy transfer diagram for improving integration of industrial systems

Jean-Christophe Bonhivers¹, Milan Korbel¹, Mikhail Sorin², Luciana Savulescu³ and Paul R. Stuart¹

¹NSERC Design Engineering Chair in Process Integration, Department of Chemical Engineering, École Polytechnique de Montréal

²University of Sherbrooke, Department of mechanical engineering, Mikhail.V.Sorin@USherbrooke.ca

³ Natural Resources Canada, Department of energy, Canmet, Luciana.Savulescu@RNCAN-NRCAN.gc.ca

Corresponding author: Paul Stuart

Telephone +1 514 340 4711 extension 4384; fax +1 514 340 5150

Email address: paul.stuart@polymtl.ca

Abstract

In industrial processes, heat is transferred from the heating utilities to the environment or converted to another form of energy. Process operations and heat exchanges decrease the energy quality, i.e. the heat is cascaded to lower temperatures. This paper focuses on the energy retrofit analysis by screening the transfer of energy across process operations and heat exchangers. A new conceptual diagram is proposed to capture the flow rate of heat transferred from the heating utilities to the environment through each heat exchanger and process operation as a function of temperature. The diagram considers heat savings by retrofit of the process units and the heat exchanger network (HEN), which was not fully addressed by previous methods. As an example of application the diagram is used to identify heat saving modifications in a furfural process, alone or hosted in a kraft pulp mill. The heat consumption in the furfural process alone can be reduced by 40% by two modifications in the HEN; the net heat consumption in the furfural process hosted in a kraft pulp mill can be reduced by 60% to 84% with a few simple modifications in the HEN and process operations.

Key words: energy integration, retrofit, heat-exchanger network, exergy analysis, site-wide analysis

1. Introduction

1.1. Context and importance of the topic

The integration of industrial processes has positive economic and environmental impacts. Graphical methods have been widely used in the area of process integration [1-6]. Aided by these methods, many successful studies have been carried out. Most of these methods have been developed for grass-root design of heat exchanger networks (HEN) or mass exchange networks, where there is a large degree of freedom in the design. In retrofitting, the existing equipment constrain the opportunities for cost-efficient integration. Consequently information about the initial network has to be included, and some analysis methods have thereafter been modified for retrofit situations [7-10]. However difficulties in application of existing approaches for HEN retrofit, especially when the heat and water networks are strongly interrelated, are still encountered; these are due to the lack of understanding how the energy passes from the hot utilities to the environment. This shortcoming will be rectified in this paper, whose the objective is to show that approaches for HEN retrofit can greatly benefit from considering the flow rate of heat cascaded through the existing heat exchangers and process operations.

Heat used in industrial processes is converted into electricity or chemical energy, or degraded through the HEN and unit operations. The process heat demands and sources are related by unit operations. For a plant-wide energy analysis, it is important to include the information about the degradation of energy due to the utility system, HEN, and process operations.

In this paper we present a graphical method for the analysis of an industrial plant heat system. The proposed diagram can be used to identify the heat savings modifications in the process operations and HEN. Energy transfer curves are proposed to represent the flow rate of heat transferred as a function of temperature through each process operation and heat exchanger from the heating utility to the environment. These curves are used to identify sets of modifications for improving the overall energy efficiency.

1.2. Earlier works

The representation of heat demands and sources with composite curves has contributed to the success of pinch analysis for heat exchanger network design [6]. The traditional hot, cold, and grand composite curves of Pinch analysis are based on process heat sources and demands. They do not include data about the existing HEN, although such information is important for the retrofit. The advanced composite curves [9-11] have been developed for HEN retrofit. These show in a single illustration the potential heat savings that would result from a reduced global temperature difference, the actual locations of heaters and coolers in the network before retrofit, the theoretical upper and lower temperatures of these, and the excess heat, both directly available and potential. These curves are used to estimate the heat-saving

potential of economically feasible projects before detailed design calculations. The authors note that releasing heaters placed low in temperature and coolers placed high in temperature is usually easier and less expensive than releasing other heaters or coolers because fewer heat exchanger modifications and less exchange area are required. The curves can also be used to evaluate the amount of excess heat that can be extracted in practice at each temperature level for further heat integration.

Graphical tools also include the heat exchange area versus energy consumption plot, driving-force plot, and heat loads plot for the analysis of indirect-contact heat exchanger networks [12]. Pinch-based approaches have thereafter been developed to improve direct-contact heat exchange networks in grassroots or retrofit situation, e.g. water tank curves for the hot and warm water management in industrial processes [13-14]. Developments in data extraction for non-isothermal mixing and retrofit situation especially have been accomplished [15].

Energy is conserved and degraded through the process operations and heat exchanges. Reducing the overall heat demand implies reducing the flow rate of heat transferred from the heating utility to the environment through the operations or the heat exchanges. Although the concept of a heat cascade has been in use for many years, the progressive transfer of heat in the process operations and existing heat exchanges from the heating utility to the environment is not explicitly analyzed in the present methods for heat integration retrofit. The advanced composite curves which have been developed for HEN retrofit do represent the flow rate of cascaded heat through the existing heaters and coolers, but do not represent the transfers in the existing process-process heat exchangers, nor in the individual process operations. To reduce the heat consumption in an existing HEN implies bridging heat outlets to hot utility users via a set of HEN modifications. Bridge analysis enumerates the fundamental sets of modifications, which are termed “bridges”. A bridge links heat outlets to hot utility users through a set of modifications. All the bridges can be identified on an energy transfer diagram. Although all the bridges can be systematically identified with an algorithm, the energy transfer diagram presented in this paper is useful to understand the principles of bridge analysis.

1.3. Objectives of the paper

This paper presents the fundamental thermodynamic insights to better understand and to visualize the degradation of energy while passing through the HEN and process operations. The proposed diagram provides a global picture about the plant energy system and the possible modifications for energy efficiency improvement.

More specifically, the objectives are the following:

- To present the concept of energy transfer curve
- To present how to use the proposed diagram
- To present an application for the energy analysis of an industrial process.

1.4. Organization of the paper

Principles of bridge analysis to reduce the heat consumption by HEN retrofit are first presented. The second part includes a general presentation of the diagram and describes the concept of energy transfer curve, which represents the flow rate of heat transferred through a heat exchanger or process operation as a function of temperature. To illustrate the concept, the energy transfer curves corresponding to a heat exchanger and a distillation column system are then evaluated. The next part explains how to identify heat savings modifications in the HEN or process operations. Finally, the diagram is used for the heat integration of a furfural production process.

1.5. Terminology and conventions

Heat is transferred in a heat exchanger from a supplier to a receptor. Supplier of cooling system C_x , internal (process-process) heat exchanger E_y , and heater H_z are noted c_x^s , e_y^s and h_z^s , respectively. Receptor of cooling system C_x , internal (process-process) heat exchanger E_y and heater H_z are noted c_x^r , e_y^r and h_z^r respectively. These conventions are summarized in [Table 1](#). The supplier in a heater comes from a heating utility HU . Heat is sent to the environment through a cooling system. A match is a couple composed of a supplier and receptor. For example, the match corresponding to heater H_z is noted $h_z^s h_z^r$.

The conventions are the following:

c_x^r : Receptor of cooling system C_x (environment)

c_x^s : Supplier of cooling system C_x

C_x : Cooling system

E_y : Internal heat exchanger

e_y^r : Receptor of internal heat exchanger E_y

e_y^s : Supplier of internal heat exchanger E_y

$\dot{E}(T)$: Flow rate of energy transferred through temperature T , kW

Env: Environment

H_z : Heater

h_z^r : Receptor of heater H_z

h_z^s : Supplier of heater H_z (hot utility)

$\dot{h}_i(T)$: Cumulated heat flow rate of inlet i to a system at temperature T , kW

$\dot{h}_o(T)$: Cumulated heat flow rate of outlet o from a system at temperature T , kW

$H_i(T)$: Mass enthalpy of inlet i at temperature T , kJ/kg

$H_o(T)$: Mass enthalpy of outlet o at temperature T , kJ/kg

HU: Hot utility

\dot{m}_i : Mass flow-rate of inlet i , kg/s

\dot{m}_o : Mass flow-rate of outlet o , kg/s

PO: Process operation

T_e : Environment temperature

T_i : Temperature of inlet i

T_o : Temperature of outlet o

Table 1 Conventions for heat exchanges

Equipment	Cooling system, C_x	Internal heat exchanger, E_y	Heater, H_z
Match	$c_x^s \ c_x^r$	$e_y^s \ e_y^r$	$h_z^s \ h_z^r$
Source stream	Process sources		Heating utility, HU
Supplier	c_x^s	e_y^s	h_z^s
Heat transfer	↓	↓	↓
Receptor	c_x^r	e_y^r	h_z^r
Sink stream	Environment, Env	Process demand	

2. Concepts of energy transfer diagram

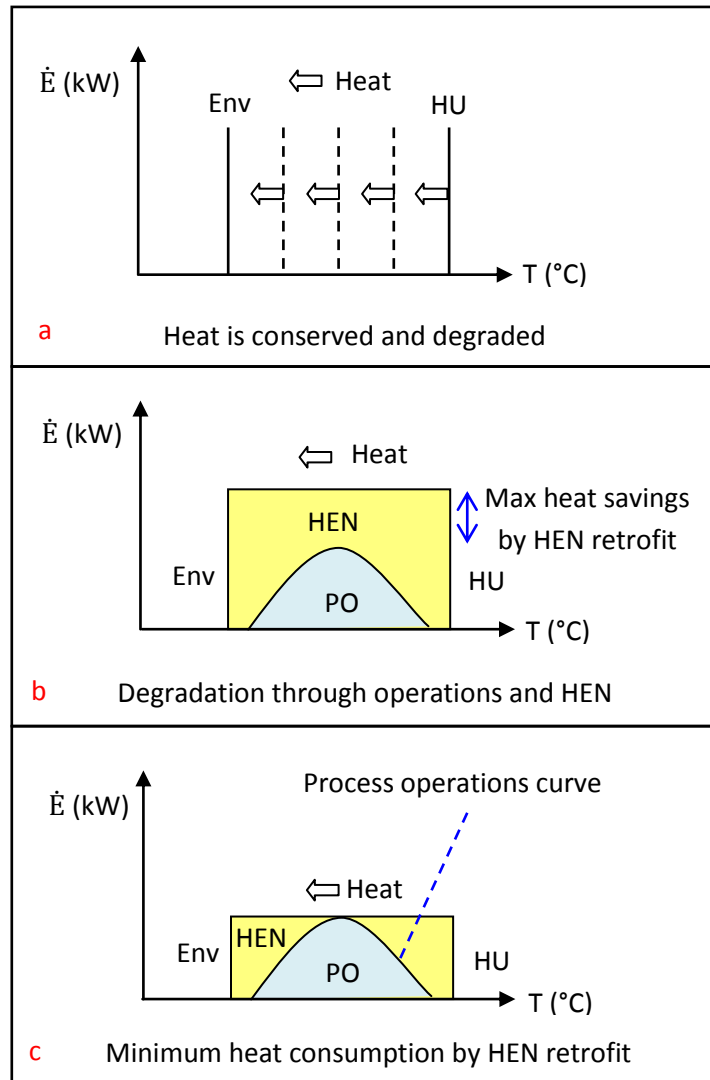
The principle of the diagram and how to evaluate the curve corresponding to a process component are described hereafter.

2.1 Principle

Energy is transferred from the heating utilities to process operations and heat exchangers and finally rejected to the environment. The energy transfer diagram shows the first and second principles of thermodynamics through heat exchanges and process operations, i.e. energy conservation and degradation (Figure 1a). The kinetic energy of molecules at the heating utility level is gradually transmitted to an increasing number of molecules with less kinetic energy until the maximum degradation of heat at the environment temperature.

In the energy transfer diagram the ordinate axis represents the flow rate of energy transferred \dot{E} in kW, and the abscissa represents the temperature range between the heating utilities and the environment. The diagram shows the degradation of heat through each existing heat exchanger and process operation. If the heat is not converted into another form of energy, then the heat is cascaded until the environment.

The energy transfer diagram represents the actual flow rate of energy that is transferred through any chosen system (heat exchanger, process operation or plant). If the system is a process where heat is not converted to another form of energy, then the corresponding diagram is of a rectangular shape; this shows that energy is conserved at each temperature level from the heating utilities to the environment and is progressively degraded to lower temperature. The minimum heat consumption that can be achieved by HEN retrofit is equal to the maximum of the global process curve (Figures 1b and 1c). The global process curve is the border between the process area which includes the operations, and the HEN which includes the heat exchangers. In order to achieve heat savings, a set of HEN modifications that reduces the flow rate of heat transferred between the heating utility and environment is necessary; such sets of modifications will be described in section 5. The lowering of the global process curve on the diagram by modifying the process operations results in a decrease of the minimum heat consumption. As shown hereafter, the HEN area in the diagram can be decomposed into the individual heat exchangers, and the process area can be decomposed into the individual process operations. Notice that the global process curve corresponds to the Grand Composite Curve of Pinch Analysis that would result from a data extraction that includes all the heat demands and sources with a global minimum temperature difference between the hot and cold composite curves equal to zero.

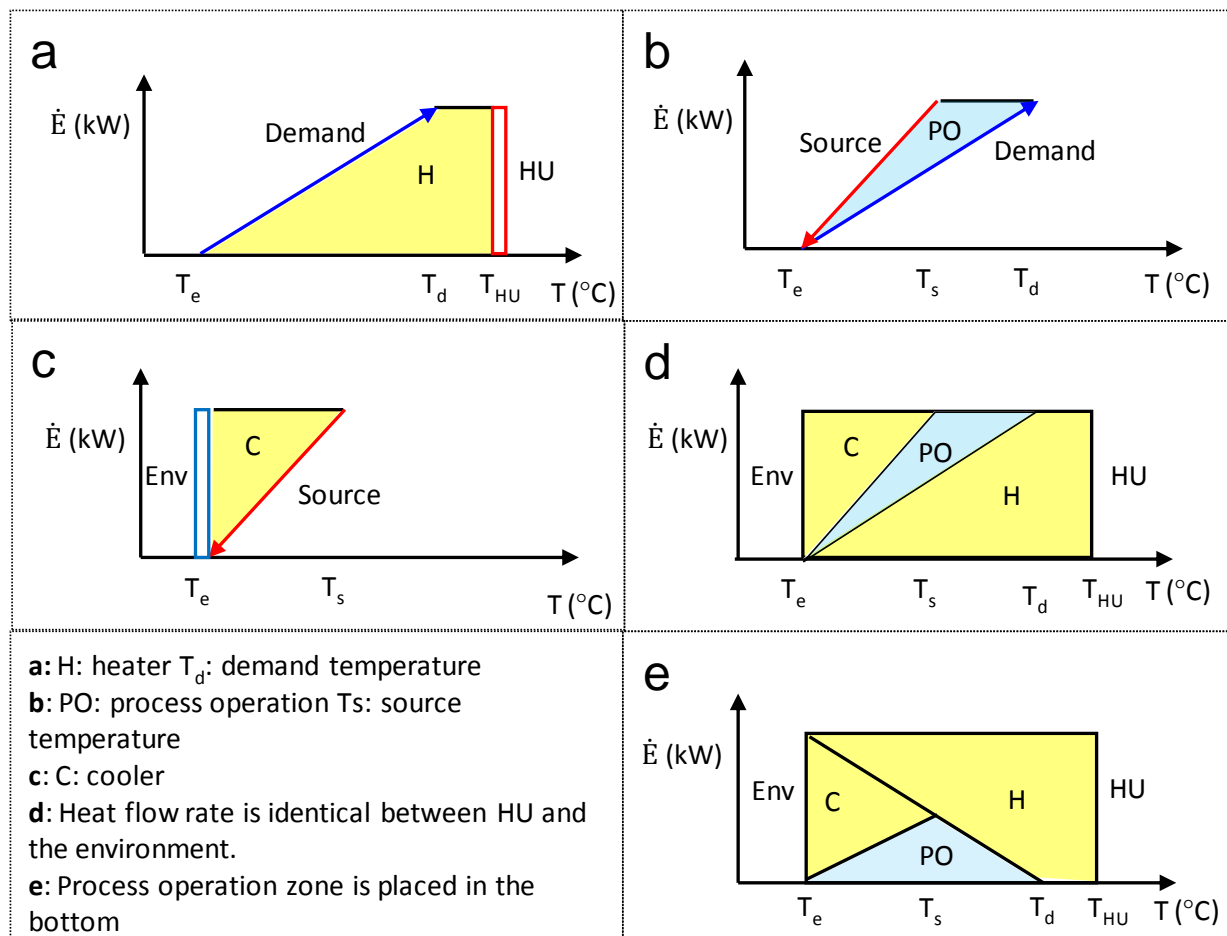


Figures 1: Energy transfer diagram and minimum heat

Figure 2a shows the flow rate of transferred heat \dot{E} between a heating utility HU to a process demand from environment temperature T_e to T_d through a heater H . Notice that the flow rate of transferred heat increases from T_e to T_d . Process operations degrade the quality of heat; i.e. energy is conserved but the entropy increases. Figure 2b shows the source from process operation PO at temperature T_s lower than T_d ; this source results from heat degradation due to the process operation, e.g. a mixing with a stream at the environment temperature. Then the source is cooled from T_s to the environment through a cooler C (Figure 2c). Notice that the flow rate of cascaded heat increases from T_s to T_e because of gradual heat release from the source. Figure 2d shows that the flow rate of cascaded heat \dot{E} is identical between the heating utility and the environment; this results from energy balance and no-conversion of heat into another form of energy. Figure 2e shows the same diagram with rearrangement of zones; the zone

corresponding to heat degradation due to process operation is placed in the bottom. Notice that the placement of the process operation zone in the bottom results from a simple translation at each temperature level: the flow rate of transferred heat as a function of temperature is the same in the two situations. Three heat degradation zones are visible, corresponding to heater H , cooler C and process operation PO . Notice that the degradation of heat due to process operations leads to a maximum of the process operations curve, which correspond to a pinch point.

The energy transfer curve of an existing heat exchanger or process operation represents the flow rate of heat transferred as a function of temperature; such curve is evaluated for each existing heat exchanger and process operation. For convenience in this paper, all the energy transfer curves of process operations are placed in the bottom of the diagram. However other arrangements are possible.



Figures 2: Principle of energy transfer diagram

2.2 How to evaluate the energy transfer curve corresponding to a system?

The flow rate of energy transferred between the heating utility and the environment results from energy balance at each temperature. The flow rate of transferred energy $\dot{E}(T)$ through temperature T is equal to the difference between the outlet cumulated heat flow rate and the inlet cumulated heat flow rate at temperature T , with the environment chosen as the reference (Equation 1). The reference to the environment means that the enthalpy of a stream is the amount of energy necessary to reach this temperature starting from environment temperature T_e . At environment temperature, the cumulated heat flow rate is equal to zero.

$$\dot{E}(T) = \sum_o \dot{h}_o(T) - \sum_i \dot{h}_i(T) \quad (\text{Equation 1})$$

$$\dot{h}_o(T) = \dot{m}_o * (H_o(T) - H_o(T_e)) \quad \text{if } T \leq T_o$$

$$\dot{h}_o(T) = \dot{m}_o * (H_o(T_o) - H_o(T_e)) \quad \text{if } T > T_o$$

$$\dot{h}_i(T) = \dot{m}_i * (H_i(T) - H_i(T_e)) \quad \text{if } T \leq T_i$$

$$\dot{h}_i(T) = \dot{m}_i * (H_i(T_i) - H_i(T_e)) \quad \text{if } T > T_i$$

With

$\dot{E}(T)$: Flow rate of energy transferred through temperature T , kW

$\dot{h}_i(T)$: Cumulated heat flow rate of inlet i at temperature T , kW

$\dot{h}_o(T)$: Cumulated heat flow rate of outlet o at temperature T , kW

$H_i(T)$: Mass enthalpy of inlet i at temperature T , kJ/kg

$H_o(T)$: Mass enthalpy of outlet o at temperature T , kJ/kg

\dot{m}_i : Mass flow-rate of inlet i , kg/s

\dot{m}_o : Mass flow-rate of outlet o , kg/s

T_e : Environment temperature

T_i : Temperature of inlet i

T_o : Temperature of outlet o

In the terminology of pinch analysis, the energy transfer curve of a system is the difference between the composite curve of the system outlets and the composite curve of the system inlets, with the environment temperature chosen as the reference.

The cumulated heat flow rate increases from the environment until the required stream temperature (Figure 3). The energy transfer curve of a system only depends on its inlets and outlets; the system may be a plant, a process department, a process operation, a heat exchanger, etc. Two illustrative examples

(a heat exchanger and a distillation column), and a case study involving an entire process will be described in this paper.

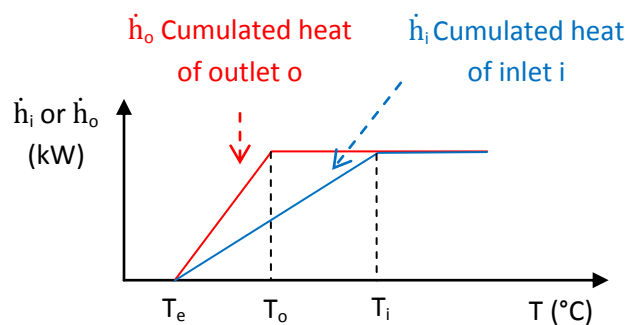
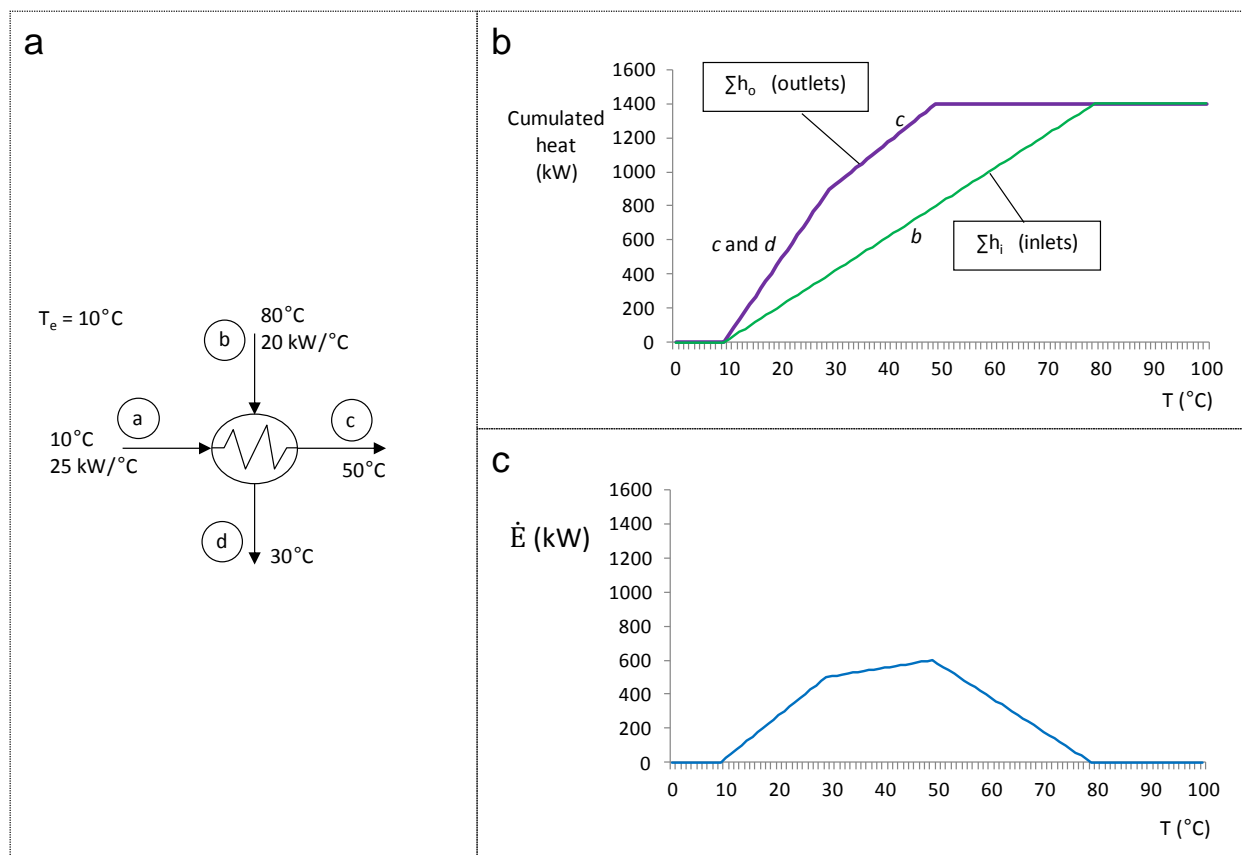


Figure 3: Cumulated heat flow rate increases from environment temperature T_e until inlet temperature T_i or outlet temperature T_o .

3. Illustrative examples

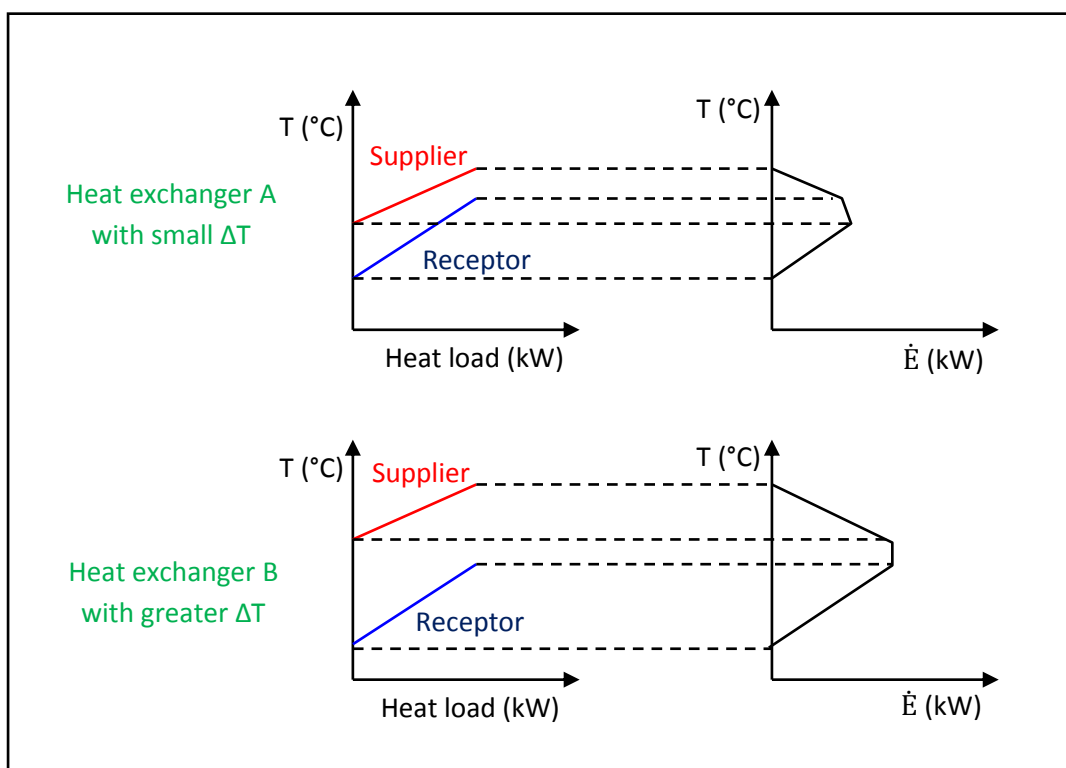
3.1 Energy transfer curve of a heat exchanger

Figures 4a, 4b and 4c show an example of indirect-contact heat exchange, the corresponding cumulated heat flow rate of inlets and outlets and the energy transfer curve, respectively. The cumulated heat flow rates are evaluated starting at the environment temperature, which is equal to 10°C . The transfer curve corresponding to a heat exchanger can be evaluated from general equation (1), or from the heat load versus temperature curves used in pinch analysis as presented on Figures 5. These figures also show the impact of temperature difference on the transfer curve. The heat loads in heat exchangers A and B are identical. However the temperature difference in heat exchanger B is greater than the one in heat exchanger A. As can be observed, the flow rate of cascaded heat in heat exchanger B is also greater. The flow rate of heat cascaded through a heat exchanger increases with its load and its temperature difference. Most profitable bridges usually imply modifications of exchanges with big flow rate of cascaded heat. See part 4 for details on how to use the diagram.



Figures 4

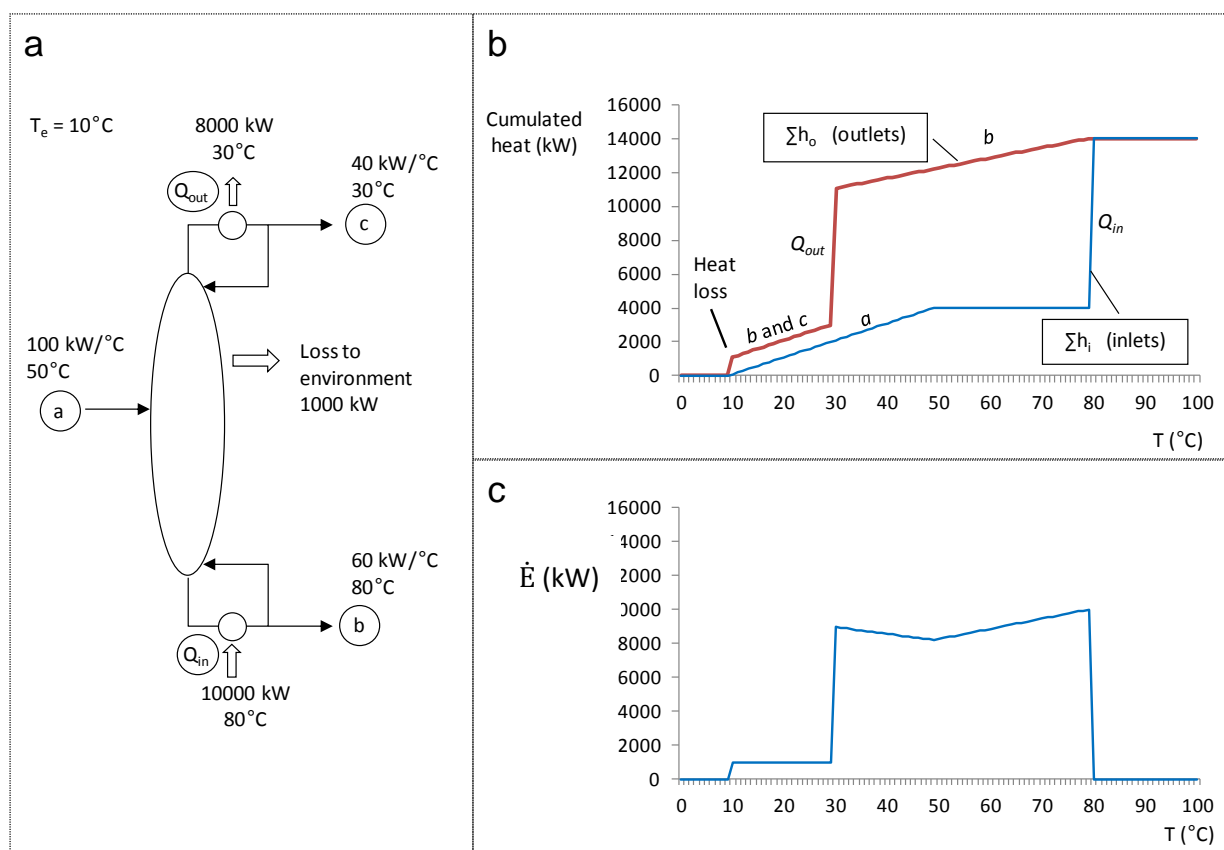
4a: heat exchanger - 4b: cumulative heat curves - 4c: energy transfer curve



Figures 5: Link between heat load curves of pinch analysis and energy transfer curves, and impact of temperature difference on flow rate of energy transferred \dot{E} .

3.2. Energy transfer curve of a distillation column

Previously we described a heat exchanger which can be a part of a HEN. In this example we evaluate the transfer curve of a process operation. **Figure 6a** shows an example of heat inlets and outlets for a distillation column. Some heat loss to the environment is also supposed. The temperatures of heat input at the reboiler and heat outlet at the condenser are 80°C and 30°C, respectively. The cumulated heat flow rate curves of inlets and outlets increase from the environment temperature, which is equal to 10°C, until the stream temperature, as shown on **Figure 6b**. The energy transfer curve, which is the difference between the outlets and inlets cumulated heat curves, is shown on **Figure 6c**.



Figures 6

6a: distillation column system - 6b: cumulative heat curves - 6c: energy transfer diagram

4. How to use the energy transfer diagram

The energy transfer diagram can be used to identify modifications of the HEN and process operations to save energy, and for a site-wide energy analysis.

4.1 Identification of HEN modifications to save energy

Energy is conserved and degraded through heat exchanges and process operations. To reduce the heat consumption in an existing HEN, it is necessary to reduce the flow rate of cascaded heat from the heating utilities to the environment by modifications in the heat exchangers. These heat savings modifications imply bridging heat outlets to hot utility users [17, 18]. The description of the fundamental set of conditions establishing a link between a heat withdrawn to environment and heat supply from a hot utility through the HEN, termed “bridge”, is important for insight-based or optimization-based approaches to reduce the heat consumption by HEN retrofit. Principles of bridge analysis for HEN retrofit are described hereafter. Then the use of the energy transfer diagram is presented.

Principle of bridge analysis to reduce the heat consumption by HEN retrofit

Bridge analysis has been developed for HEN retrofit and includes the following:

- The description of the fundamental sets of modifications to save energy, which are termed “bridges”. A bridge is a set of matches that connects a heat outlet c_x^s to a heater receptor h_z^r .
- A method to enumerate the bridges.
- A network table to easily evaluate them.
- An energy transfer diagram which can be used to identify the heat savings modifications (bridges).

In bridge analysis, process heat sources are decomposed into suppliers of process-process heat exchanger e_y^s , and suppliers of cooler c_x^s in the existing network. Process heat demands are decomposed into receptors of process-process heat exchanger e_y^r , and receptors of heater h_z^r in the existing network. Note that c_x^s and h_z^r represent a heat outlet and a hot utility user, respectively.

Bridge description

A match is a couple composed of a supplier and a receptor. A set of matches connecting heat outlets to hot utility users is termed “bridge”. A prime bridge cannot be decomposed into other bridges and has one of the two following formats:

$$\begin{aligned} & \{c_x^s \ h_z^r\} \\ & \text{Or} \\ & \{c_x^s \ e_{y1}^r, e_{y1}^s \ e_{y2}^r, \dots, e_{yn-1}^s \ e_{yn}^r, e_{yn}^s \ h_z^r\} \end{aligned}$$

Where x is the label of a cooler C , z is the label of a heater H , and $\{y_1, \dots, y_n\}$ is a subset of n distinct labels of process-process exchangers E .

In the first format heat that was sent to the environment before retrofit is directly used for the receptor of a heater. In the second format heat that was sent to the environment before retrofit is used for the receptor of an internal heat exchanger; its supplier before retrofit which is now partially or totally released can be used for another receptor, and so until reaching the receptor of a heater. The heat transfer along a bridge is the fundamental way to save energy. Composite bridge can be decomposed into other bridges. For a given set of streams only bridges can lead to heat savings.

Identification of bridges

The bridges can be identified with an algorithm, a grid diagram, an energy transfer diagram, or a network table. The following approach is proposed to reduce the number of operations for the enumeration of bridges:

- The set of potential matches is the union of relevant prime bridges. A prime bridge is considered as relevant if its investment cost is non-prohibitive and if its heat savings capacity is significant.
- Bridges are identified according an increasing number of matches which are all included in the set of potential matches. The enumeration stops when the heat savings capacity no longer increases.

Evaluation of heat savings capacity of a bridge

Evaluation of the heat savings capacity of a bridge corresponds to a small linear programming problem (LP). The final network topology can be identified either by engineering analysis or mathematical programming. The optimization approach implies the use of binary variables to take into account design constraints. A formulation based on a transportation model for heat exchanges, such as the model developed in [19] and [20], can be used, and solved by mixed integer linear programming (MILP). The decision variables are limited to bridge modifications.

Use of the energy transfer diagram for HEN retrofit

If the process operations are not modified, then the minimum heat consumption by HEN retrofit without taking into account connection constraints is equal to the maximum of the global process operation curve (Figures 1a and 1b). Notice that the minimum heat consumption with respect to temperature difference constraints can be evaluated by shifting each supplier and receptor on the abscissa by its contribution to a practical minimum temperature difference.

An example of a small conceptual HEN is shown on Figure 7a. Figure 7b shows the HEN after retrofit, which results in minimum heat consumption. The energy transfer diagrams before and after retrofit are

shown at **Figures 8a and 8b**, respectively. Note that the diagram does not have a rectangle shape on these figures because the process operations are not considered. The focus is on the HEN retrofit. The heat savings capacity is equal to the minimum value of the total flow rate of transferred energy, i.e. 1000kW. Any reduction of the heat consumption implies reducing the flow rate of heat cascaded from the heating utilities to the environment by modifications in the existing heat exchanger network. The use of the heat outlet of cooler C_1 to heat receptor of E_1 allows releasing the supplier of E_1 which can then be used for receptor of H_1 ; i.e. a set of two new matches is necessary $\{c_1^s e_1^r, e_1^s h_1^r\}$. This set of modifications bridges a heat outlet to a heating utility user and is shown with arrows on **Figure 8a**. Such sets of modifications (bridge) result in down-translating the total energy transfer curve between the heating utilities and the environment. All the bridges can be identified with the energy transfer diagram. Note that if the curves corresponding to heat exchangers whose hot end temperature of supplier is higher are placed in the bottom, then a downward arrow means a new no-criss-cross match while an upward arrow means a new criss-cross match.

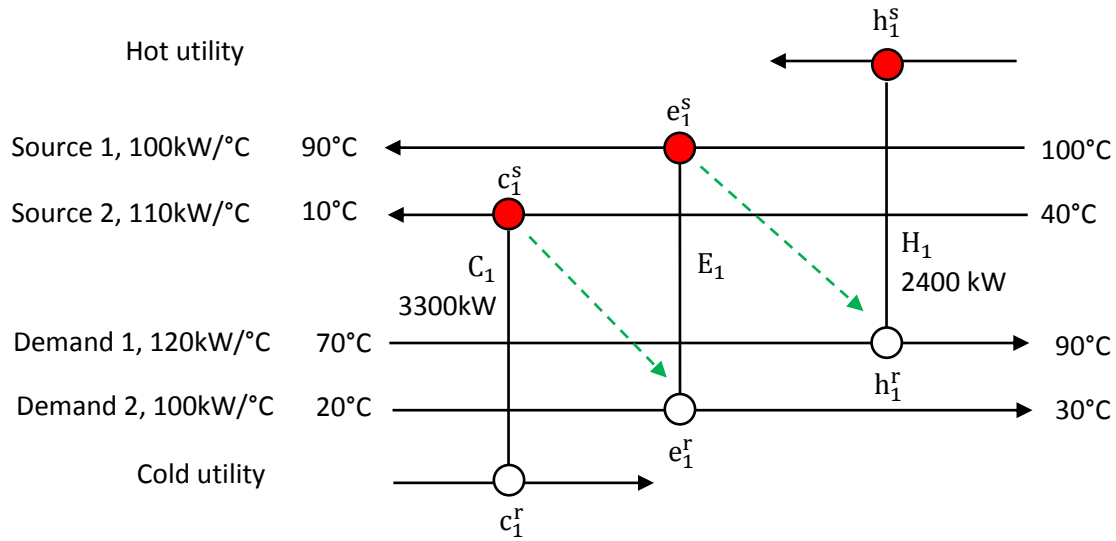


Figure 7a: Network before retrofit - Arrows show bridge modifications $\{c_1^s e_1^r, e_1^s h_1^r\}$.

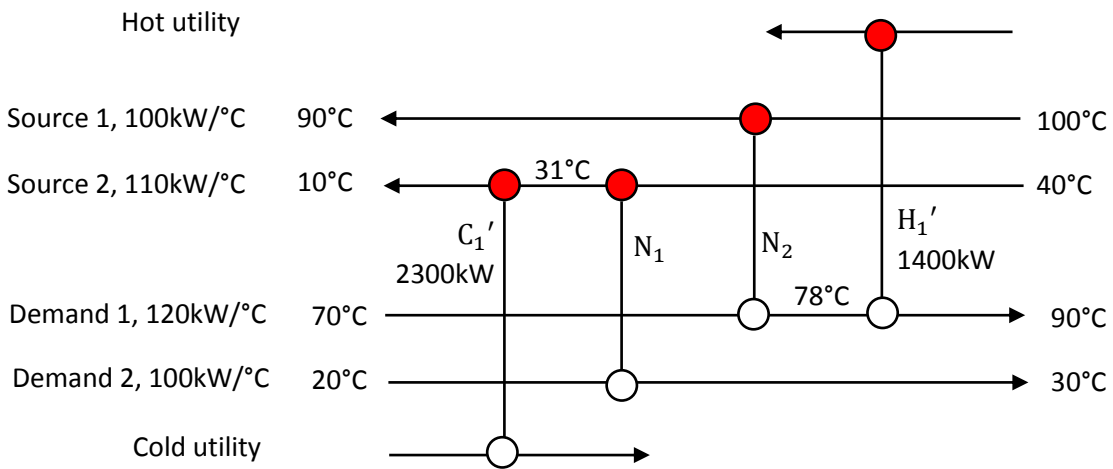


Figure 7b: Network after retrofit

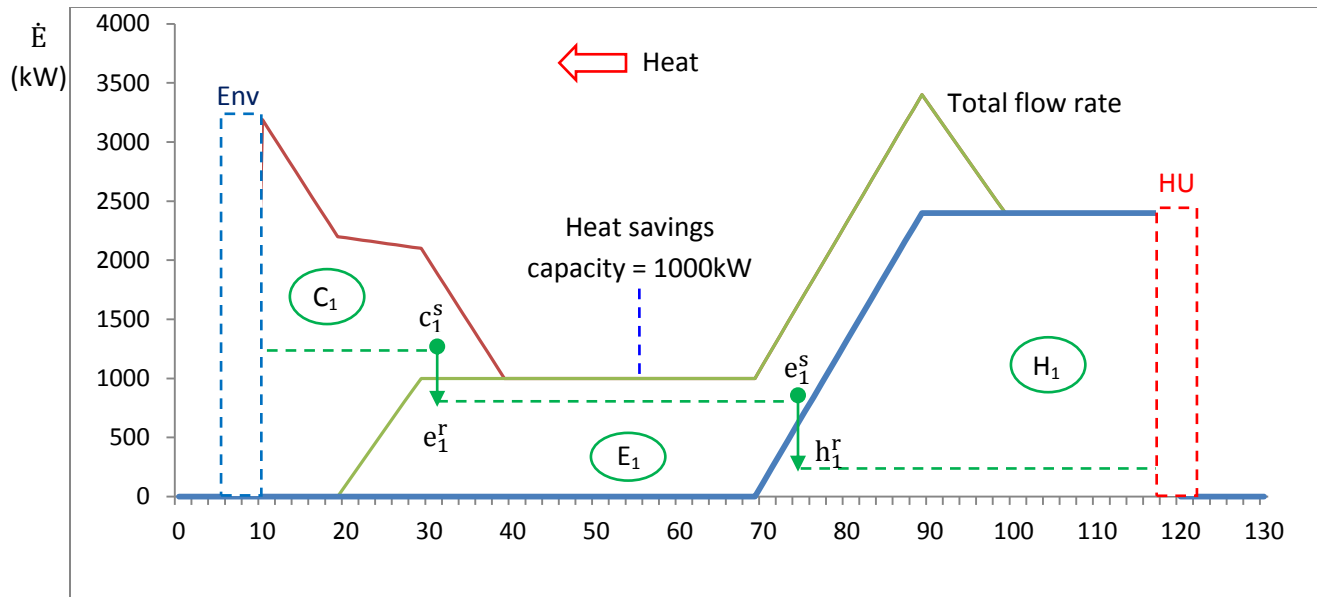


Figure 8a: Energy transfer diagram before retrofit - Arrows show bridge $\{c_1^s, e_1^r, e_1^s, h_1^r\}$ $T (^{\circ}\text{C})$

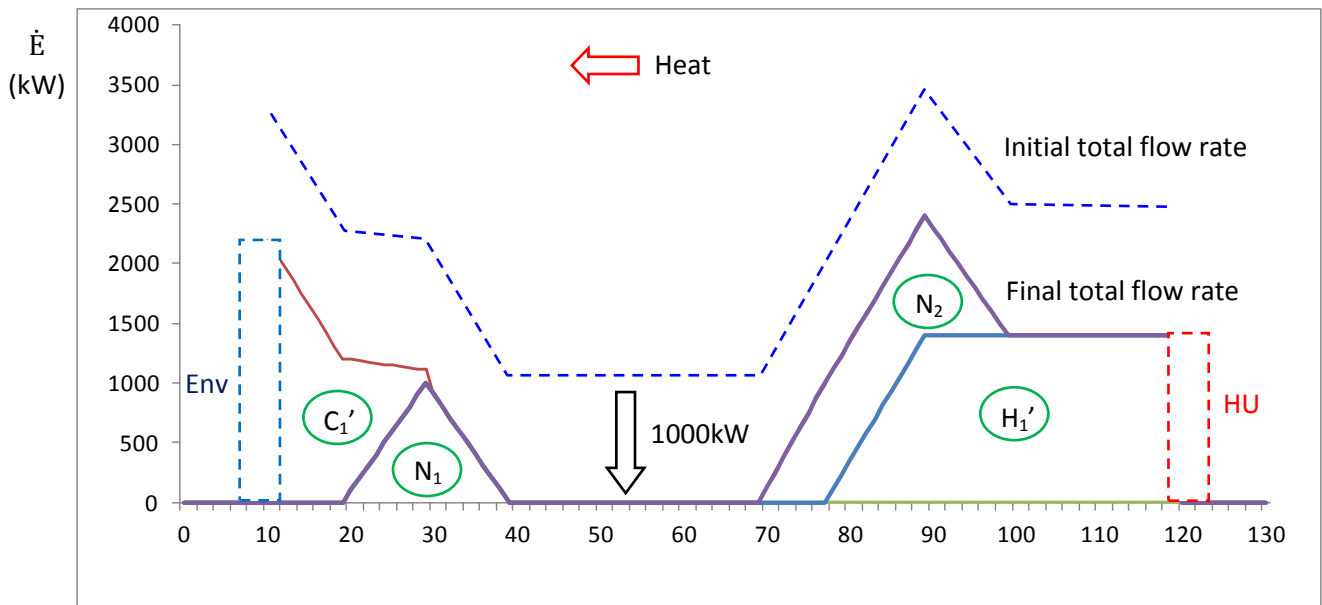
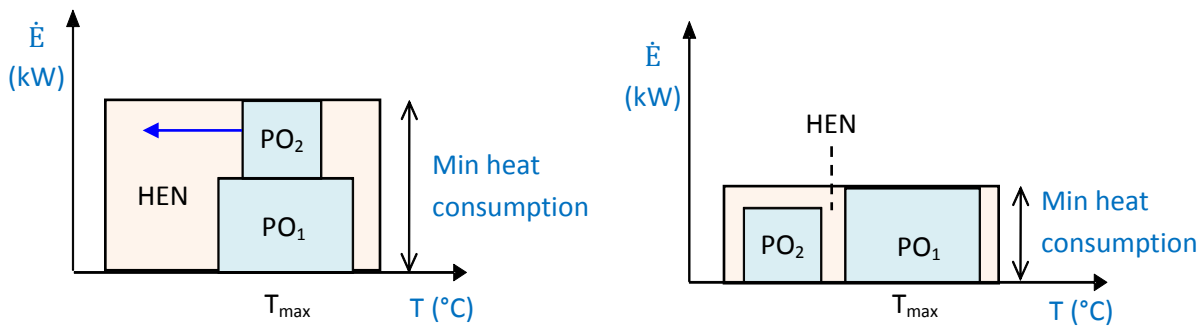


Figure 8b: Energy transfer diagram after retrofit - Bridge modifications $\{c_1^s, e_1^r, e_1^s, h_1^r\}$ $T (^{\circ}\text{C})$

4.2 Identification of process modifications to save heat

In the previous section, we have dealt with heat savings by HEN retrofit only. However process operations also can be modified to reduce the heat consumption. The minimum of heat consumption without connection constraints is equal to the maximum of the global process curve (Figures 1a and 1b). The maximum of process curve, which is located at T_{\max} , can only be lowered by modifying process operations through which transferred heat flow rate is non null at T_{\max} . For example this might imply suppressing a heat loss, reducing the heat degradation due to a non-isothermal mixing, or modifying the pressure of a distillation column, as shown on Figures 9. It is worthwhile to insist that modifications of process operations can result in heat savings only with the corresponding bridge modifications in the HEN. The diagram, which shows the heat transfer in each process operation and heat exchanger, is especially useful for the system analysis.



Figures 9: Reduction of the minimum heat consumption by modifying the pressure of distillation column PO_2

4.3 Representation of energy conversion and site-wide analysis

Heat, electricity and chemical enthalpy are usual forms of energy which can be converted in plants. For example, high pressure steam feeds a turbine and produce electricity, and then lower pressure steam at the turbine outlet feeds the process through a HEN; this heat is either stocked in chemical energy through an endothermic reaction or dissipated to the environment (Figure 10). The energy conservation, degradation, and conversion in any industrial system can be represented on the diagram with the use of the exergy-energy ratio on abscissa instead of temperature. Figure 10 also represents the exergy loss corresponding to electricity production through a turbine: the exergy loss is equal to the exergy decrease due to reduction of steam pressure in turbine minus the exergy increase due to electricity production. The potential applications of the diagrams are much wider than HEN retrofit. The diagram can also be used for placement of multiple utilities, evaluation of available excess heat, and identification of opportunities to insert a heat pump. Work is continuing for site-wide analysis.

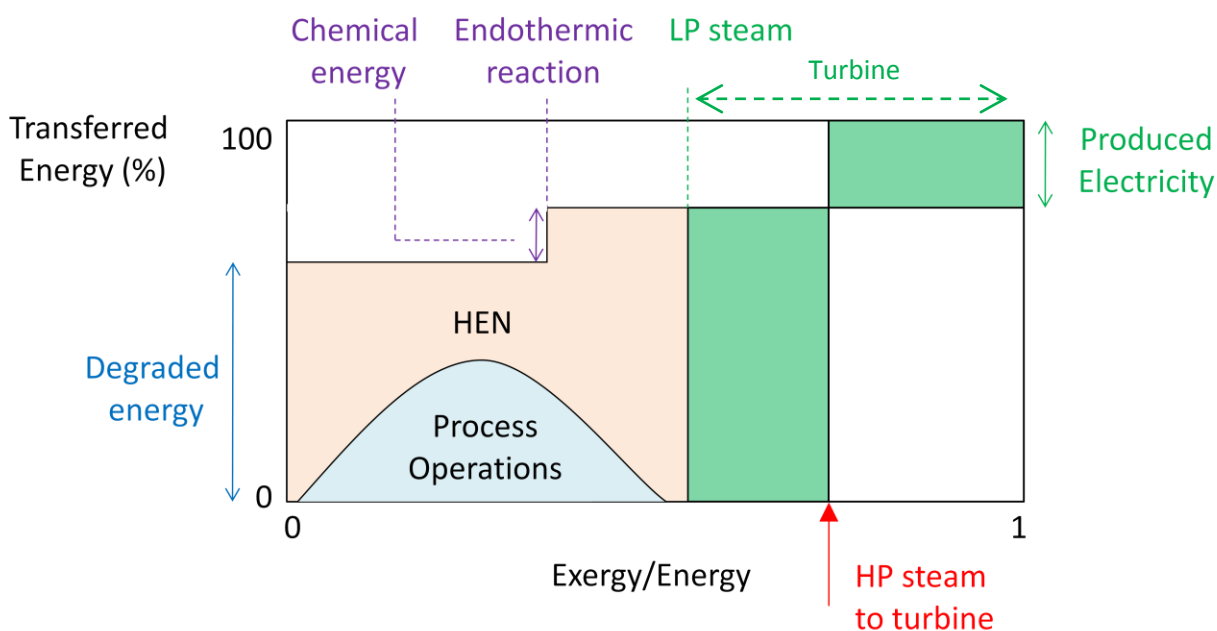


Figure 10: Energy transfer diagram with energy conversion

4.4 Summary

The concepts and potential applications of the energy transfer diagram were presented. The diagram represents the heat conservation and degradation due to each process operation and each heat exchanger. The degradation of heat through the process operations results in heat excess at lower temperature and heat deficit at higher temperature. The border between the excess and deficit areas corresponds to the maximum of the process operations curve. The energy transfer diagram explains the existence of these excess and deficit heat areas and shows the minimum heat consumption by HEN retrofit with respect to a minimum allowed temperature difference between sources and demands. It also shows the modifications in the process and HEN necessary to reduce the heat consumption.

If the thermal energy is not converted to another form of energy, the flow rate of transferred heat is identical along all the temperature range down to the environment; this shows the conservation and degradation of heat.

The energy transfer diagram provides a global view for the energy analysis of a plant. The information potentially available is the following:

- Heat savings modifications by HEN retrofit: to save heat implies a set of modifications that reduce the flow rate of transferred heat from the heating utilities to the environment. All the bridges are visualized.
- Minimum heat consumption by heat exchanger network retrofit without connection constraint.
- Process operations to be modified in order to reduce the heat consumption.
- Placement of multiple utilities, available excess heat, opportunity to insert a heat pump.
- Exergy loss of each operation and heat exchanger, which is equal to the corresponding area in the diagram with the ratio energy/exergy for abscissa.

5. Application: energy analysis of MTC furfural process

We illustrate hereafter the use of the energy transfer diagram for the energy analysis of an industrial process.

A large spectrum of valuable products can be produced from biomass. New processes based on biomass are developed for the interest of the global community. Clusters of bio-based manufactures offer economic opportunities: logistic cost, capital investment cost and production cost are reduced by sharing utilities and equipments, scaling-up common operations, and inter-process mass and energy integration.

Furfural has been identified as one of the possible key 'green' chemicals for the future [21-23]. This compound is pinpointed as important chemicals intermediate from biomass, not produced in major quantities in petroleum refineries. A study towards the identification of the most promising platform chemicals supported by US Department of Energy revealed that furfural and two of its derivatives, levulinic acid and furan carboxylic acid, are ranked within the list of important chemicals and building blocks. For now the interest to build new stand-alone plants to increase the production of furfural is controversial.

This section shows the use of energy transfer diagram for the energy analysis of the MTC process [23] which produces furfural from several types of biomass. Modifications in the heat exchanger network and process operations are proposed to decrease the heat consumption in the furfural process alone (1) and in the furfural process hosted in a kraft pulp mill (2). The methodology involves mass and energy balances, data extraction, construction of energy transfer diagram, and energy analysis.

5.1 Description of MTC furfural process

The reaction principle to produce furfural from biomass involves an acidic hydrolysis of hemi-cellulose and a dehydration of resulting C5 sugar xylose. After reaction, remaining cellulose and lignin could be converted to value-added products, or be sent to a boiler to provide heat. The reaction selectivity is a point of concern for reactor design, as furfural can quickly further react to loss byproducts. The MTC furfural process has been developed by Delft University of Technology [23]. The core of this process is its continuous reactor, a multi-turbine column (MTC) that allows hydrolysis of hemi-cellulose in xylose, dehydration of xylose to furfural and evaporation of furfural from its reaction mixture as soon as produced to prevent any degradation. The yield in furfural of this process would be greater than 85%. Its reaction principles are similar to those of Suprayield, Biofine and Vedernikovs processes for the production of furfural and levulinic acid.

The block scheme of MTC furfural process is shown at Figure 11. Straw is initially chosen as the feedstock. During pretreatment biomass is milled and the air removed. Biomass is mixed with water and

sulfuric acid, and the resulting slurry enters MTC reactor from the top while steam rises up from the bottom. Furfural produced is directly stripped from the liquid phase with steam at 10 bars, to prevent detrimental follow-up reactions that can take place in the liquid phase. The MTC reactor uses 12.5 ton steam at 10 bars and 175°C per ton of furfural produced. The choice of the steam temperature results from studies on kinetic of reaction in order to maximize the production of furfural. The mixture of liquid water and remaining organics, i.e. cellulose and lignin, leaves the reactor at the bottom and is filtered. The cellulose-lignin remain from belt filtration can be converted into value-added product, or it could be fired to produce combined heat and power. A furfural-steam azeotrop mixture leaves the MTC reactor at the top, is condensed and cooled down to 30°C before a liquid-liquid extraction step. Extraction of furfural with toluene enables separating the water bulk and most of the organic acids from furfural. Sodium hydroxide is added to neutralize organic acids; the resulting salts are dissolved in the aqueous phase. The water mixture is sent to a stripping column; the furfural-toluene mixture is sent to the distillation column. Mass and energy balances to produce annually ten kilotons furfural, which is approximately 3% of the current market production in the world, have been evaluated. **Table 2** shows data extracted.

5.2. Identification of heat savings modifications

The process operation curves are shown in the energy transfer diagram on **Figure 12a**. The minimum heating utility consumption without connection constraints, i.e. the maximum of process operations curve, is equal to 9.5MW. The effect of each individual operation on heat degradation is shown. The reaction to transform xylose to furfural occurs at 175°C and is endothermic. At that temperature, thermal energy is converted to chemical energy. This decreases the heat flow between the reaction temperature and the environment. **Figure 12b** shows the HEN part of the energy transfer diagram before HEN retrofit. Heat bridges connect the environment to the heating utilities through the HEN. The maximum transferred heat flow rates through exchanges E_1 , E_2 and H_2 are small. Internal heat exchangers E_1 and E_2 are already well placed. Heater H_2 requires less than 0.5 MW heat. The energy transfer diagram shows that main heat savings modifications should be using heat outlet c_2^S for heating utility users h_1^r and h_3^r . Arrows show heat savings modifications $c_2^S h_1^r$ and $c_2^S h_3^r$. The heat excess from c_2^S can be then used for the kraft pulp process. **Figure 12c** shows the energy transfer diagram after bridge modifications $c_2^S h_1^r$ and $c_2^S h_3^r$ which result in 6.7 MW heat savings. The diagram also indicates that two supplementary small prime bridges are necessary to achieve the minimum heat consumption by HEN retrofit: $\{c_2^S h_2^r\}$ and $\{c_2^S e_1^r, e_1^S h_3^r\}$. However the heat savings capacity of these bridges is much smaller than the capacity of the previous ones, $\{c_2^S h_1^r\}$ and $\{c_2^S h_3^r\}$.

We chose to place the process operations zone in the bottom for this analysis. The focus was on the energy degradation due to each individual process operation. The curves corresponding to heat exchangers were not ordered according to hot-end temperature of supplier. However the HEN zone could also be placed in the bottom and the process operations zone on the top. In this case the curves corresponding to each heat exchanger could be reordered as in **Figures 8**, i.e. curves with higher hot end temperature of supplier in the bottom; and in this configuration a downward arrow means a new no-criss-cross match while an upward arrow means a new criss-cross match.

Figure 12a

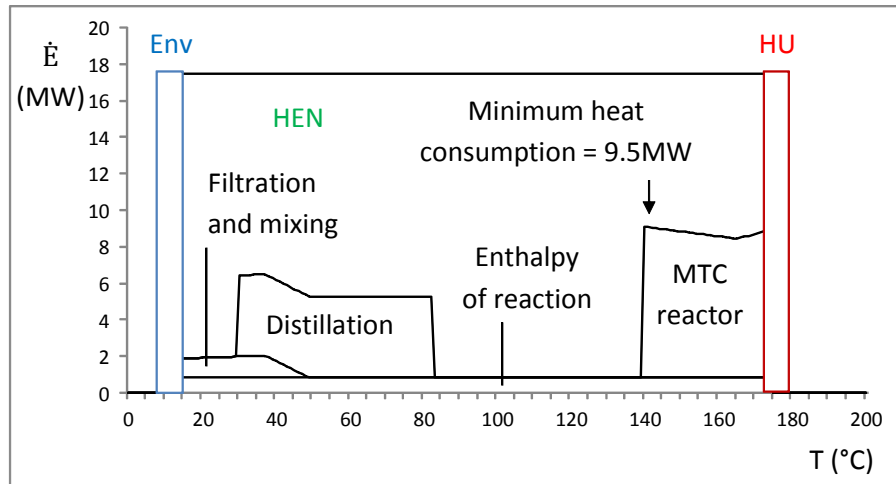


Figure 12b

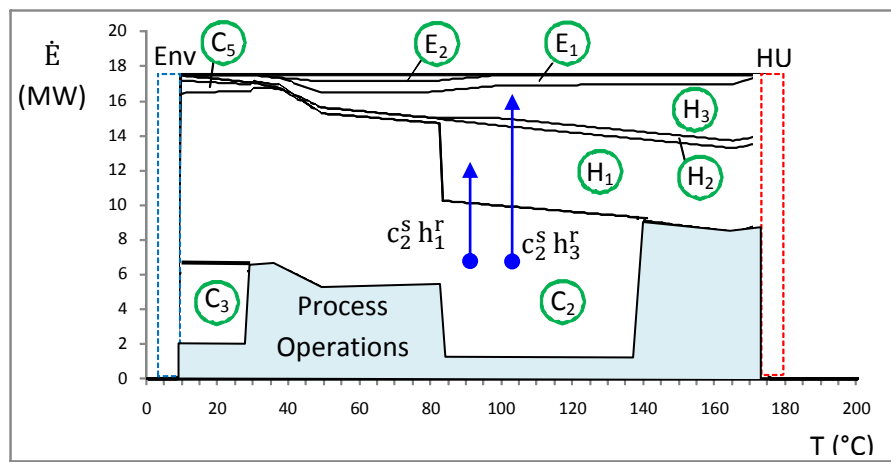
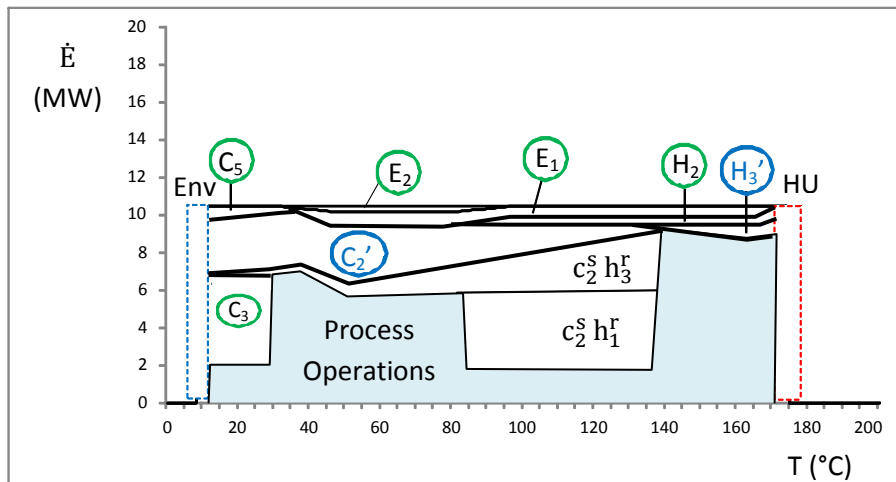


Figure 12c



Figures 12

5.3. Advantages of integration with a kraft pulp process

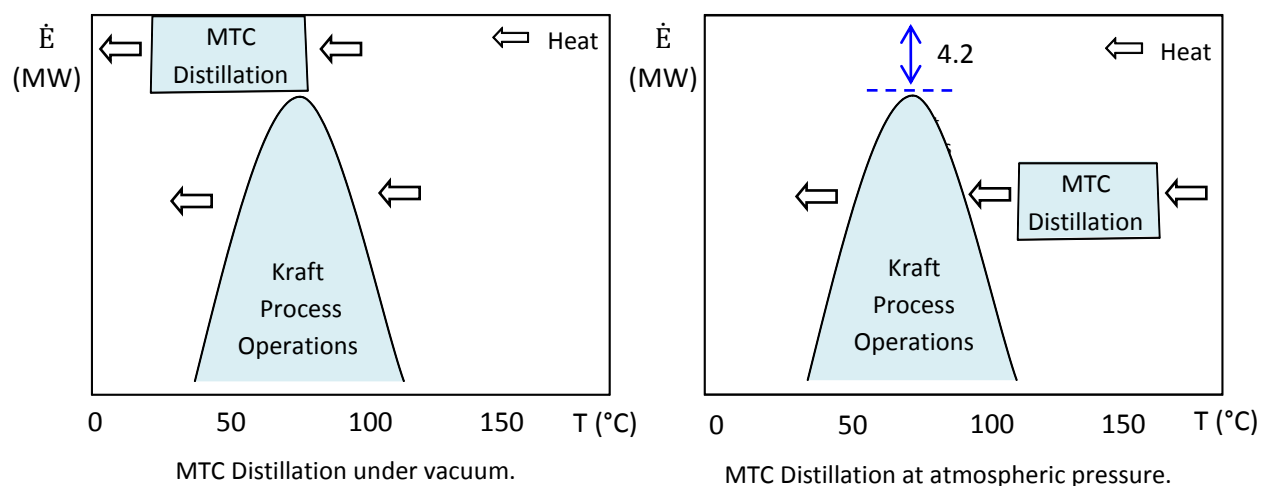
Mass integration

Most components of inlet or outlet streams of furfural process are familiar to the kraft pulp process. A kraft pulp mill can provide the following to the furfural process: hot water which would reduce further steam consumption for the furfural production, white liquor, soda or lime for neutralization of acids in decanter, steam at 10b and electricity. A kraft pulp mill can also accept furfural process outlets, such as organics and water streams. Most organics from biomass do not react in MTC reactor and leave the process after filtration; these organics are cellulose and lignin. Remaining organics can feed other bio-processes, or be sent to the kraft mill, e.g. the digester, the multi-effect evaporator, and the recovery or biomass boiler to produce heat and power. Water outlet contains sodium sulfate, sodium acetate, and sodium formate, which can be isolated or sent to the brown stock washing or the chemical recovery area.

Heat integration

Kraft pulp process requires mainly low pressure steam at 130°C and releases excess heat below 80°C. Consequently, the secondary steam produced at the outlet of MTC reactor c_2^S at 140°C can be used to the kraft process. Excess heat from the kraft process however cannot easily be used for the distillation under vacuum in the furfural process, which needs heat above 83°C. However if the furfural is acid free at the inlet of distillation, the column can work at atmospheric pressure; this modification would result in shifting the distillation curve to higher temperature on the energy transfer diagram (Figures 15). As a result, the temperature of heat outlet from top of distillation column c_3^S would be increased to 110°C, which allows its use to the kraft process. In summary, distillation at atmospheric pressure would result in condensing toluene at 110°C at the top of the column, which allows producing 4.2MW secondary steam usable in the kraft process. For example, this secondary steam can be used for preheating chips to reduce the heating utility consumption in the digester. Only the heat degradation due to the distillation system and a part of kraft process is shown on Figures 13.

After modifications to save energy, the furfural process provides a large heat excess if the combustion of remaining organics is taken into account. At the capacity of 10,000 ton furfural per year (base case) this heat excess amounts to 20-30 MW. This heat can be used for the kraft process, to produce electricity or to synthesize bio-products, e.g. derivatives like levulinic acid, furan, etc. Results of energy analysis are summarized in Table 3.



Figures 13: Energy transfer diagram showing the principle to integrate the distillation system of MTC process in the kraft pulp process.

Table 3 Comparison of heat consumption in furfural process

Case description	Savings (%)	Primary HU use (MW)	Heat sent to Kraft (MW)	Bridge modifications	Savings (MW)
Furfural process alone before retrofit	0	17.3	0.0	-	-
Furfural process alone after HEN retrofit	39	10.6	0.0	$c_2^s h_1^r$	4.3
				$c_2^s h_3^r$	2.4
Furfural process with Kraft Low pressure distillation	60	10.6	3.7	$c_2^s h_1^r$	4.3
				$c_2^s h_3^r$	2.4
				c_2^s to Kraft	3.7
Furfural process with Kraft Atm. pressure distillation	84	10.6	7.9	$c_2^s h_1^r$	4.3
				$c_2^s h_3^r$	2.4
				c_2^s to Kraft	3.7
				c_3^s to Kraft	4.2

6. Conclusion

The main contribution of this paper is the representation on a diagram of successive transfers of heat from the heating utility to the environment through each heat exchanger and each process operation of a plant. The proposed diagram is useful to identify modifications in the utility system, HEN and process operations; it supports a method for a plant-wide energy analysis.

The concepts of an energy transfer diagram which shows the heat degradation through process operations and existing heat exchangers have been presented. To save heat implies modifications reducing the flow rate of energy transferred from the heating utilities to the environment. This diagram provides a global view on heat savings possibilities. The energy transfer curve of an existing heat exchanger or process operation represents the flow rate of heat transferred as a function of temperature; such curve is evaluated for each existing heat exchanger and process operation.

Information available from the energy transfer diagram includes the following: the modifications in the heat exchanger network necessary for heat savings (bridges), the minimum heat consumption without connection constraint by modifying the heat exchanger network, which corresponds to the maximum of global process operation curve, the placement of multiple utilities, the available excess heat, the opportunity to insert a heat pump, the modifications of individual process operations necessary to reduce the heat consumption, and the exergy loss of any operation or heat exchanger which is equal to the corresponding area in the diagram with the ratio exergy - energy on the abscissa. The minimum of heat consumption by HEN retrofit with respect to a minimum temperature difference is equal to the maximum of the process operations curve after shifting the heat inlets and outlets on the temperature axis in accordance with their specific contributions. For example if an inlet of a system needs a temperature difference with the wall of at least 5°C in an indirect-contact heat exchange, its cumulated heat flow rate curve will be shifted on the temperature axis to the right by 5°C. This diagram also explains the presence of the deficit and excess heat areas in a plant; these are due to the heat degradation in the process operations.

The diagram was used for the energy analysis of a furfural process. The specific heat consumption in the MTC furfural process in the base case (50GJ/t furfural) is much smaller than most other furfural processes. However the analysis still shows a high potential for further heat savings. If the MTC furfural process stands alone, the heat consumption can be reduced by 39% with two modifications in the heat exchanger network. If the MTC furfural process is hosted in a kraft pulp mill, the net heat consumption can be reduced by 60% with three modifications in the HEN, and by 84% with a change in the distillation column pressure, or modifications of the water network in the kraft pulp. Beside energy aspects, the advantages for a kraft pulp mill to host biomass-based processes are significant.

7. References

- [1] El Halwagi, M.M., Solve design puzzles with mass integration, Chemical engineering progress, 1998, v: 94, no 8: 25 -44
- [2] El Halwagi, M. M., Pollution Prevention through Process Integration: Systematic Design Tool, Academic Press, San Diego (1997)
- [3] El Halwagi, M. M., A.A. Hamad, and G.W. Garrison, Synthesis of waste Interception and Allocation Networks, AIChE J., 42 (11), pp 3087-3101 (1996)
- [4] B. Linnhoff, E. Hindmarsh, The pinch design method for heat exchanger networks, in: Understanding Process Integration, Lancaster, 1982.
- [5] B. Linnhoff, S. Ahmad, Cost optimum heat-exchanger networks. 1. Minimum energy and capital using simple-models for capital costs, Computers & Chemical Engineering 14 (7) (1990) 729–750.
- [6] B. Linnhoff, Pinch analysis – a state-of-the-art overview, Chemical Engineering Research & Design 71 (1993) 503–522.
- [7] B. Linnhoff, T.N. Tjoe, Pinch technology retrofit: setting targets for existing plant, in: AIChE National Meeting, Houston, TX, 1985.
- [8] Tjoe, T.N., Linnhoff, B., Using pinch technology for process retrofit, Chemical Engineering 93, 47-60 (1986).
- [9] R. Nordman, T. Berntsson, Use of advanced composite curves for assessing cost-effective HEN retrofit I. Theory and concepts, Applied Thermal Engineering (2008).
- [10] R. Nordman, T. Berntsson, Use of advanced composite curves for assessing cost-effective HEN retrofit II. Case studies, Applied Thermal Engineering (2008).
- [11] Ruhonen, P., Ahtila, P., “Analysis of a mechanical pulp and paper mill using advanced composite curves”, Applied Thermal Engineering 30 (2010) 649-657.
- [12] Piacentino, A., “Thermal analysis and new insights to support decision making in retrofit and relaxation of heat exchanger networks”, Applied Thermal Engineering, 31 (2011) 3479-3499.
- [13] Nordman, R., Berntsson, T., Design of Kraft pulp mill hot water system—A new method that maximizes excess heat, Applied Thermal Engineering 26, 363 (2006).
- [14] Savulescu, L., Sorin, M. and Smith, R., Direct and indirect heat transfer in water network systems, Applied Thermal Engineering, Volume 22, Issue 8, 981-988, 2002.

- [15] Alva-Argaez A., Savulescu L., Poulin B., A process Integration-based decision support system for the identification of water and energy efficiency improvements in the pulp and paper industry, PAPTAC 93rd Annual Meeting, 2007
- [16] Bakhtiari, B., Bedard, S., Retrofitting heat exchanger networks using a modified network pinch approach, *Applied Thermal Engineering* 51 (2013) 973-979
- [17] Bonhivers, J.C., Bala, S., Stuart, P, "Bridge analysis for heat exchanger network retrofit, part 1: concepts", *Energy*
- [18] Bonhivers, J.C., Bala, S., Stuart, P, "Bridge analysis for heat exchanger network retrofit, part 2: applications", *Energy*
- [19].Pettersson, F., Synthesis of large-scale heat exchanger networks using a sequential match reduction approach, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 29, Issue 5, 15 April 2005, Pages 993–1007.
- [20].Barbaro, A., Bagajewicz, M. J., New rigorous one-step MILP formulation for heat exchanger network synthesis, *Computers and Chemical Engineering* 29 (2005) 1945–1976.
- [21] Zeitsch, K., J., "The Chemistry and technology of furfural and its many by-products", 2000, Elsevier Science, Amsterdam.
- [22] Hayes, D. J., Fitzpatrick, S., Hayes, M.H.B. and Ross, J.R.H., "The Biofine process - Production of Levulinic Acid, Furfural, and Formic Acid from Lignocellulosic Feedstock", *Biorefineries -- Industrial Processes and Products*, B. Kamm, P. R. Gruber and M. Kamm Eds., 2006, vol. 1, 139-164, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim.
- [23] De Jong, W., Marcotullio, G., Overview of Biorefineries based on Co-production of Furfural, Existing Concepts and Novel Developments, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 8 [2010], Article A69

ANNEXE 5

Rapport : Formulation mathématique pour identifier la topologie du réseau d'échangeurs de chaleur résultant de modifications pontales

Formulation for the design of HEN resulting from bridge modifications

Principle: a transportation formulation has been adapted for the design of HEN resulting from bridge modifications. This model permits split streams and non-isothermal mixing. Variables that do not participate to the corresponding bridge cannot be modified, and consequently the search space is strongly reduced in this MILP problem.

All the continuous variables correspond to cells of network table 2. The heat exchange area is expressed as a linear combination of heat transfer flows. To satisfy the energy balance the sum of heat flows in any row and column is fixed. Binary variables have been added to express constraints for the design. In terms of transportation formulation an exchanger unit must have the same split fraction in each element participating in the heat transfer for a certain match. Only the first and the last element in a sequence of active elements may have lower values to indicate that the heat transfer does not necessarily begin or end exactly at the boundaries of the intervals. These constraints are expressed in equations (5) and (8). These constraints come from (Pettersson, 2005). Constraints (10) are new and have been added to reduce the number of decision variables.

The main limitations in the initial formulation from (Pettersson, 2005) are the following: (1) maximum one heat exchanger may be placed between one source and one sink, (2) temperature intervals have to be decomposed manually in some situations. These limitations are removed with the proposed modifications which are described hereafter.

The following sets are defined:

- $S = \{s | s \text{ is a process source}\}$
- $D = \{d | d \text{ is a process demand}\}$
- $HU = \{hu | hu \text{ is a hot utility}\}$
- $CU = \{cu | cu \text{ is a cold utility}\}$
- $ES = \{es | es \text{ is an element in } s \in S\}$
- $ED = \{ed | ed \text{ is an element in } d \in D\}$

The following variables are used:

- A total heat exchange area after retrofit
- $A_{s,es,d,ed}$ heat exchange area for the transfer between element es in source s and element ed in demand d
- $A_{s,es,cu}$ heat exchange area for the transfer between element es in source s and cold utility cu
- $A_{hu,d,ed}$ heat exchange area for the transfer between hot utility hu and element ed in demand d
- $b_{s,d}$ binary variable indicating if a match between source s and demand d is included in the solution
- $b_{s,cu}$ binary variable indicating if a match between source s and cold utility is included in the solution
- $b_{hu,d}$ binary variable indicating if a match between hot utility hu and demand d is included in the solution
- $by_{s,es,d}$ binary variable indicating if the element es in source s participates in the heat transfer to demand d
- $bx_{s,d,ed}$ binary variable indicating if the element ed in demand d participates in the heat transfer from source s
- q_{hu} total heat duty of hot utilities
- q_{cu} total heat duty of cold utilities
- $q_{s,es,d,ed}$ heat transfer between the element es in source s and element ed in demand d
- $q_{s,es,cu}$ heat transfer between the element es in source s and cold utility cu
- $q_{hu,d,ed}$ heat transfer between hot utility hu and element ed in demand d
- $x_{s,d,ed}$ use fraction for the heat transfer from source s to element ed in demand d
- $x_{s,d}^{split}$ demand split ratio for the match (s,d)

- $y_{s,es,d}$ use fraction for the heat transfer from element es in source d to demand d
- $y_{s,d}^{split}$ source split ratio for the match (s,d)
- $zx_{s,d,ed}$ binary variable indicating if $x_{s,d,ed}$ increases with ed
- $zy_{s,es,d}$ binary variable indicating if $y_{s,es,d}$ increases with es

Others:

- $Q_{s,es}$ available heat in element es in source s
- $Q_{d,ed}$ required heat in element ed in demand d
- $c1, \dots, c2$ annual cost factors (parameters)

Only variables involved in the bridge may be modified for the design.

A set of elements es in source s corresponds to each supplier P ; a set of elements ed in demand d corresponds to each receptor R .

$$P = \{(s, es)\} \quad s \in S, es \in ES$$

$$R = \{(d, ed)\} \quad d \in D, ed \in ED$$

A match between a supplier P and a receptor R is noted (P, R) . The set of existing matches E and the set of new matches in a bridge structure B are defined as follow:

$$E = \{(P, R)\} \quad \text{Set of initial matches}$$

$$B = \{(P, R)\} \quad \text{Set of new matches in bridge structures}$$

Heat transfer variables that are not involved in the bridge are fixed to their initial value. Criteria of involvement of variables $q_{s,es,d,ed}$, $q_{hu,d,ed}$ and $q_{s,es,cu}$ for the design of bridge are the following:

- The variable $q_{s,es,d,ed}$ can be modified if one of these conditions is satisfied:
 - $(s, es) \in P, (d, ed) \in R, (P, R) \in B$
 - $(s, es) \in P, (d, ed) \in R, (P, R) \in E$ and $(P, RR) \in B$
 - $(s, es) \in P, (d, ed) \in R, (P, R) \in E$ and $(PP, R) \in B$
- The variable $q_{hu,d,ed}$ can be modified if $(d, ed) \in R$ and $(P, R) \in B$
- The variable $q_{s,es,cu}$ can be modified if $(s, es) \in P$ and $(P, R) \in B$
- Other heat transfer variables, which are not involved in bridge, are equal to their initial values:
 - $q_{s,es,d,ed} = q_{s,es,d,ed}^0$
 - $q_{hu,d,ed} = q_{hu,d,ed}^0$
 - $q_{s,es,cu} = q_{s,es,cu}^0$

- (1) Objective function to be maximized is profit (revenue - investment):

$$\begin{aligned} \max (& \text{initial cost } HU - c1 q_{HU} + \text{initial cost } CU - c1 q_{CU} - c3 (A - \text{initial area}) \\ & - \sum_{(P,R) \in B} c_{(P,R)} - \sum_{s \in S, d \in D} c4_{s,d} b_{s,d} - \sum_{d \in D} c5_{hu,d} b_{hu,d} - \sum_{s \in S} c6_{s,cu} b_{s,cu}) \end{aligned}$$

- (2) Evaluation of heat exchange area after HEN retrofit, A :

$$A = \sum_{s \in S} \sum_{es \in ES} \sum_{d \in D} \sum_{ed \in ED} A_{s,es,d,ed} + \sum_{d \in D} \sum_{ed \in ED} A_{hu,d,ed} + \sum_{s \in S} \sum_{es \in ES} A_{s,es,cu}$$

$$A_{s,es,d,ed} = \frac{q_{s,es,d,ed}}{U_{s,d} \Delta TLM_{s,es,d,ed}}$$

$$A_{hu,d,ed} = \frac{q_{hu,d,ed}}{U_{hu,d} \Delta TLM_{hu,d,ed}}$$

$$A_{s,es,cu} = \frac{q_{s,es,cu}}{U_{s,cu} \Delta TLM_{s,es,cu}}$$

- (3) Evaluation of utility consumption after HEN retrofit, q_{HU} and q_{CU} :

$$q_{HU} = \sum_{hu \in HU} \sum_{d \in D} \sum_{ed \in ED} q_{hu,d,ed}$$

$$q_{CU} = \sum_{s \in S} \sum_{es \in ES} \sum_{cu \in CU} q_{s,es,cu}$$

- (4) Evaluation of heat flows after HEN retrofit $q_{s,es,d,ed}$:

$$Q_{s,es} = \sum_{d \in D} \sum_{ed \in ED} q_{s,es,d,ed} + \sum_{cu \in CU} q_{s,es,cu}$$

$$Q_{d,ed} = \sum_{s \in B} \sum_{es \in ES} q_{s,es,d,ed} + \sum_{hu \in HU} q_{hu,d,ed}$$

$$Q_{d,ed} = \sum_{s \in B} \sum_{es \in ES} q_{s,es,d,ed} + \sum_{hu \in HU} q_{hu,d,ed}$$

$$q_{s,es,d,ed} \geq 0 \text{ and } q_{s,es,cu} \geq 0 \text{ and } q_{hu,d,ed} \geq 0$$

- (4) Evaluation of use fraction in each element in source and demand, $y_{s,es,d}$ and $x_{s,d,ed}$:

$$y_{s,es,d} = \frac{1}{Q_{s,es}} \sum_{ed \in ED} q_{s,es,d,ed}$$

$$y_{s,es,cu} = \frac{1}{Q_{s,es}} \sum_{cu \in CU} q_{s,es,cu}$$

$$x_{s,d,ed} = \frac{1}{Q_{d,ed}} \sum_{es \in ES} q_{s,es,d,ed}$$

$$x_{hu,d,ed} = \frac{1}{Q_{d,ed}} \sum_{hu \in HU} q_{hu,d,ed}$$

- (5) The use fractions at the extremities are equal or smaller than the split ratios $y_{s,d}^{split}$ and $x_{s,d}^{split}$

$$y_{s,es,d} \leq y_{s,d}^{split}$$

$$x_{s,d,ed} \leq x_{s,d}^{split}$$

- (6) Evaluation of binary variables $by_{s,es,d}$ and $bx_{s,d,ed}$ corresponding to use fraction $y_{s,es,d}$ and $x_{s,d,ed}$

$$by_{s,es,d} \geq y_{s,es,d}$$

$$bx_{s,d,ed} \geq x_{s,d,ed}$$

- (7) The use fractions are grouped for the design:

$$by_{s,es,d} - by_{s,es-1,d} + \frac{1}{n_s} \sum_{ees=1}^{es-1} by_{s,ees,d} \leq 1$$

$$bx_{s,d,ed} - bx_{s,d,ed-1} + \frac{1}{n_d} \sum_{eed=1}^{ed-1} bx_{s,d,eed} \leq 1$$

- (8) All the internal use fractions $y_{s,es,d}$ and $x_{s,d,ed}$ must be equal to $y_{s,d}^{split}$ and $x_{s,d}^{split}$:

$$y_{s,d}^{split} - y_{s,es,d} + by_{s,es-1,d} + by_{s,es,d} + by_{s,es+1,d} \leq 3$$

$$y_{s,d}^{split} - y_{s,es,d} - by_{s,es-1,d} - by_{s,es,d} - by_{s,es+1,d} \geq -3$$

$$x_{s,d}^{split} - x_{s,d,ed} + bx_{s,d,ed-1} + bx_{s,d,ed} + bx_{s,d,ed+1} \leq 3$$

$$x_{s,d}^{split} - x_{s,d,ed} - bx_{s,d,ed-1} - bx_{s,d,ed} - bx_{s,d,ed+1} \geq -3$$

- (9) Evaluation of binary variables $b_{s,d}$, $b_{s,cu}$ and $b_{hu,d}$, where Q_s is the heat content of source s and Q_d is the heat required for demand d .

$$b_{s,d} \geq \frac{1}{n_{es}} \sum_{es \in ES} by_{s,es,d}$$

$$b_{hu,d} \geq \frac{1}{Q_d} \sum_{ed \in ED} q_{hu,d,ed}$$

$$b_{s,cu} \geq \frac{1}{Q_s} \sum_{es \in ES} q_{s,es,cu}$$

- (10) The following equations are not used in (Pettersson, 2005). These new constraints are proposed to decrease the number of decision variables. These relations represent the counter-current configuration of heat exchanger. These are obvious in network table, in which the variables $q_{s,es,d,ed}$ must be grouped in vertical or horizontal subsets. With these supplementary constraints, decision variables are limited to $y_{s,es,d}$ and $x_{s,d,ed}$.

$rs_{s,es,d,ed}$: remaining heat source in es

$rd_{s,es,d,ed}$: remaining heat demand in ed

$b_{s,es,d,ed} \in \{0,1\}$: 1 indicates heat excess; 0 indicates heat deficit

$$rs_{s,es,d,ed} = y_{s,es,d} * Q_{s,es} - \sum_{eed=ed+1}^{ned} q_{s,es,d,eed}$$

$$rd_{s,es,d,ed} = x_{s,d,ed} * Q_{d,ed} - \sum_{ees=es+1}^{nes} q_{s,ees,d,ed}$$

$$b_{s,es,d,ed} \geq (rs_{s,se,d,de} - rd_{s,es,d,ed}) / Q_{s,es}$$

$$b_{s,es,d,ed} \leq 1 + (rs_{s,se,d,de} - rd_{s,es,d,ed}) / Q_{s,es}$$

$$q_{s,es,d,ed} \leq rs_{s,es,d,ed}$$

$$q_{s,es,d,ed} \leq rd_{s,es,d,ed}$$

$$q_{s,es,d,ed} \geq rs_{s,es,d,ed} - b_{s,es,d,ed} * Q_{s,es}$$

$$q_{s,es,d,ed} \geq rd_{s,es,d,ed} - (1 - b_{s,es,d,ed}) * Q_{s,es}$$

Horizontal set indicates heat excess

Vertical set indicates heat deficit

$q_{s,es,d,ed}$

$y_{s,es,d} \rightarrow$

$x_{s,d,ed} \rightarrow$

1.00		500				
1.00		270				x
1.00		30		x	x	x
1.00	350	100	x	x	x	x
1.00	50	x	x	x	x	x
	1.00	1.00				

Counter-current configuration

Decomposition into smaller temperature intervals

In bridge analysis, the initial decomposition into temperature intervals is based on the hot end temperature of each supplier and cold end temperature of each receptor. However a further decomposition is sometime necessary to identify the arrangement of a new heat exchanger, i.e. a series or parallel configuration.

- Approach 1: Decomposition into small temperature intervals before optimization

A maximum value for temperature intervals, e.g. 5°C, is set. This simple setting is sufficient and practical because only variables involved in the bridge are allowed to be varied (subset of all the variables).

- Approach 2: Further decomposition into temperature intervals after a first optimization run

A temperature interval greater than a threshold value, e.g. 5°C, should be decomposed into smaller temperature intervals if it simultaneously meets the two following conditions in the solution from the optimization:

1. The temperature interval es of the source s includes heat flows $q_{s,es,d,ed}$ sent to at least two different demand (d), or the temperature interval ed of a demand d includes heat flows $q_{s,es,d,es}$ that come from at least two different sources (s).
2. At least one of these heat flows $q_{s,es,d,ed}$ is on the limit of the feasibility area, i.e. no lower temperature interval of the source can be used for the transfer with (d, ed).

Modifications to allow the placement of several heat exchangers between one source and one sink

The formulation proposed by (Pettersson, 2005) does not allow the placement of more than one heat exchanger between a same source and a same sink. This restriction is removed with the following modifications.

1. Replace $b_{s,d}$ by $n_{s,d}$ in the objective function of equation 1 ($n_{s,d}$ will be the number of exchangers between source s and demand d)
2. Remove equation 7 (grouping of use fractions $by_{s,es,d}$ and $bx_{s,d,ed}$).
3. Add below constraints:

$$n_{s,d} \geq \sum_{es=1}^{nes} zy_{s,es,d} \quad \forall s, d$$

$$n_{s,d} \geq \sum_{es=1}^{nes} zx_{s,d,ed} \quad \forall s, d$$

$$zy_{s,es,d} \geq by_{s,es,d} - by_{s,es,d} \quad zy_{s,es,d} = 1 \text{ If } by_{s,es,d} \text{ increases}$$

$$zy_{s,1,d} = by_{s,1,d}$$

$$zx_{s,d,ed} \geq bx_{s,d,ed} - bx_{s,d,ed-1} \quad zx_{s,d,ed} = 1 \text{ If } bx_{s,d,ed} \text{ increases}$$

$$zx_{s,d,1} = bx_{s,d,1}$$

$$by_{s,es,d} \geq y_{s,es,d}$$

$$by_{s,es,d} \leq 0.99 + y_{s,es,d} \quad by_{s,es,d} = 0 \text{ If } y_{s,es,d} < 0.01$$

$$bx_{s,d,ed} \geq x_{s,d,ed}$$

$$bx_{s,d,ed} \leq 0.99 + x_{s,d,ed} \quad bx_{s,d,ed} = 0 \text{ If } x_{s,d,ed} < 0.01$$